

Verteilte Simulation
dynamischer Materialversorgungsprozesse
der Montage in Produktionsverbänden

vorgelegt von
Diplom-Informatiker
Dirk Krütfeldt

von der Fakultät V - Verkehrs- und Maschinensysteme
der Technischen Universität Berlin
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften
- Dr.-Ing. -

genehmigte Dissertation

Promotionsausschuß:

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. habil. J. Siegmann
Berichter: Prof. Dr.-Ing. G. Seliger
Berichter: Prof. Dr.-Ing. B. Scholz-Reiter

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 06. April 2001

Berlin 2001

D 83

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb (IWF) der Technischen Universität Berlin.

Herrn Prof. Dr.-Ing. G. Seliger, dem Direktor des Bereichs Montagetechnik und Fabrikbetrieb am IWF, danke ich für die großzügige Förderung meiner Forschungsarbeiten und die wichtigen Anregungen, die zum Gelingen dieser Arbeit beitrugen.

Herrn Prof. Dr.-Ing. B. Scholz-Reiter, dem Direktor des Bereichs Intelligente Produktions- und Logistiksysteme am Bremer Institut für Betriebstechnik und angewandte Arbeitswissenschaft (BIBA), danke ich für seine wohlwollende Unterstützung dieser Arbeit.

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. J. Siegmann, dem Direktor des Instituts für Land- und Seeverkehr der Technischen Universität, danke ich für die Übernahme des Vorsitzes und das meiner Arbeit entgegengebrachte Interesse.

Allen Mitarbeitern und Mitarbeiterinnen des IWF danke ich für die vielfältige Unterstützung und stete Hilfsbereitschaft. Ganz besonders danke ich Dr.-Ing. Jörg Niemeier, Dr.-Ing. Katrin Müller, Dipl.-Ing. Philipp Heinrichsdorff, Dipl.-Ing. Markus Ciupek und Dipl.-Ing. Olaf Klein für die jahrelange gute Zusammenarbeit und die wertvollen Anregungen. Darüber hinaus gilt mein Dank meiner Frau Mirjam, die mit viel Geduld und Opferbereitschaft das Entstehen dieser Arbeit ermöglicht hat.

Alt Ruppin, im September 2001

Dirk Krütfeldt

**Verteilte Simulation dynamischer Materialversorgungsprozesse
der Montage in Produktionsverbänden**

Inhaltsverzeichnis

0	Verwendete Kurzzeichen	3
1	Einleitung	5
2	Anwendungsfeld.....	8
2.1	Materialversorgung.....	8
2.1.1	Begriffe und Definitionen.....	8
2.1.2	Zielkonflikte	11
2.2	Steuerung.....	15
2.2.1	Zentrale Verfahren	15
2.2.2	Dezentrale Verfahren	17
2.2.2.1	Fremdbezugssteuerung.....	17
2.2.2.2	Kanban	18
2.2.2.3	Agentengesellschaften	20
2.2.3	Anwendung in der Materialversorgung	25
2.3	Simulation	26
2.3.1	Einordnung in die Steuerung.....	26
2.3.2	Nutzen im Materialversorgungsprozeß.....	28
2.3.3	Rahmenbedingungen der Simulation im Verbund.....	31
3	Stand der Technik	33
3.1	Simulationssysteme	33
3.1.1	Diskrete Simulationsmodelle	33
3.1.2	Kopplungsrelevante Eigenschaften.....	35
3.1.3	Unterstützung der Anwender.....	40
3.2	Kommunikationssysteme.....	42
3.2.1	Begriffe und Definitionen.....	42
3.2.2	Objektorientierte Systeme	46
3.2.2.1	Grundlagen.....	46
3.2.2.2	Common Object Request Broker Architecture (CORBA)	48
3.2.2.3	High Level Architecture (HLA)	50
3.2.3	Agentenbasierte Systeme	54
3.2.3.1	Agenten	54
3.2.3.2	Sprache	56
3.2.3.3	Koordinationsformen.....	60
4	Defizite und Lösungsansatz	62
5	Konzeption einer verteilten Simulationsanordnung	67
5.1	Nachrichtenbasierter Ansatz	67

5.2	Simulationssysteme – Nachrichtenklassen	70
5.2.1	Auftragsdaten	70
5.2.2	Material- und Betriebsmitteldaten	71
5.2.3	Kenndaten	72
5.2.3.1	Lager	72
5.2.3.2	Transport	74
5.2.3.3	Fertigung und Montage	75
5.2.3.4	Auftrag	77
5.2.4	Dynamische Rekonfiguration	78
5.2.4.1	Fuzzy-logische Regeln	78
5.2.4.2	Verhandlungsschema	83
5.2.5	Broker	84
5.3	Experimentiersysteme - Nachrichten vom Beobachter	85
5.3.1	Versuchsplanung	85
5.3.1.1	Einfaktormethode	88
5.3.1.2	Vollfaktorielle Versuchspläne	89
5.3.1.3	Teilfaktorielle Versuchspläne	91
5.3.2	Planung und Durchführung der Experimente	93
5.4	Subsystemketten und -netze	96
5.4.1	Kopplung	96
5.4.1.1	Ausführungssysteme	96
5.4.1.2	Informationssysteme	100
5.4.2	Nachrichtenaustausch durch High Level Architecture (HLA)	103
5.4.2.1	Klassenhierarchie	103
5.4.2.2	Zeitsteuerung	105
5.4.2.3	Verhandlungen in der Coordination Language (COOL)	106
5.4.2.4	Vorgehensweise	109
6	Beispiel der Nutzung in der Automobilindustrie	112
6.1	Ausgangssituation	112
6.2	Simulation	115
6.2.1	Subsysteme und deren Kopplung	115
6.2.2	Internet - Performance	116
6.2.2.1	Implementierung	116
6.2.2.2	Zielsetzung und Faktoren	120
6.2.2.3	Ergebnisse	120
6.2.3	Potential des Verhandlungsschemas	123
7	Zusammenfassung und Ausblick	129
8	Literatur	131

0 Verwendete Kurzzeichen

A_m	WENN-Teil einer fuzzy logischen Regel
a_m	Funktion, die den WENN-Teil einer Regel in Ausprägungen zwischen den Werten 0 und 1 umwandelt
AS	Ausführungssystem
As_m	Finalproduzenten innerhalb eines Produktionsverbundes
B_m	DANN-Teil einer fuzzy logischen Regel
b_m	Funktion, die den DANN-Teil einer Regel in Ausprägungen zwischen den Werten 0 und 1 umwandelt
C_m	Komponenten der Zulieferanten innerhalb eines Produktionsverbundes
c_j	Schwerpunkt der Fläche von B_m
BOA	Belastungsorientierte Auftragsfreigabe
COM	Common Object Model
COOL	Coordination Language
CORBA	Common Object Request Broker Architecture
DELFOR	Lieferabrufe (aus dem EDIFACT-Wortschatz)
EDI	Electronic Data Interchange
EDIFACT	Elektronischer Datenaustausch für Verwaltung, Wirtschaft und Transport
FedEx	Federation Execution Process
FIFO	First In First Out (Prioritätsregel)
FTP	File Transfer Protocol
HTML	Hypertext Markup Language
HLA	High Level Architecture
HTTP	Hypertext Transfer Protocol
IDL	Interface Definition Language
IS	Informationssystem
ISCM	Integrierte Supply Chain Management
Kfz	Kraftfahrzeug
KI	Künstliche Intelligenz
KQML	Knowledge Query Meta Language
Lkw	Lastkraftwagen
M_n	Maschine
MRP I	Material Requirements Planning
MRP II	Manufacturing Resource Planning
OMG	Object Management Group
ORDCHG	Veränderungen (aus dem EDIFACT-Wortschatz)

ORDERS	Aufträge an die Zulieferanten (aus dem EDIFACT-Wortschatz)
OSI	<i>Open Systems Interconnection</i>
PPS	Produktionsplanung- und -steuerung
QUOTES	Anfragen und Angebote (aus dem EDIFACT-Wortschatz)
RPC	Remote Procedure Calls
RTI	Run Time Infrastructure
Su_n	Zulieferanten innerhalb eines Produktionsverbundes
t_0	Aktueller Zeitpunkt im Zeitablauf eines Simulationssystems
t_{lokal}	Zeitpunkt des nächsten lokalen Ereignis in einem Simulationssystem
t_{grant}	Zeitpunkt des nächsten externen Ereignis in einer verteilten Simulation
T_{fort}	Zeitabschnitt bis zum nächsten lokalen Ereignis in einem Simulationssystem oder ein festgelegter Zeitabschnitt in der zeitorientierten Steuerung mit zentralen Zeitregimes
T_{PMAX}	Maximale Pufferzeit
T_{PMIN}	Minimale Pufferzeit
T_{PD}	Durchschnittliche Pufferzeit
T_{wbz}	Wiederbeschaffungszeit
T_{vzv}	Zeit bis zum Verbau
TCP	Transmission Control Protocol
Tr_p	Transportunternehmer innerhalb eines Produktionsverbundes
V	Verhandlungswert
VDI	Verbund deutscher Ingenieure
VDA	Verbund deutscher Automobilindustrie
w_j	Zusätzliche Gewichtung von B_m
W_n	Werker
Wz_n	Werkzeug
WWW	World Wide Web
ZS	Zielsystem

1 Einleitung

Für die Wettbewerbsfähigkeit produzierender Unternehmen ist heute entscheidend, auf Kundenwünsche in kurzer Zeit flexibel reagieren zu können. Wesentliches Ziel ist es dabei, den Kundennutzen bei gleichzeitiger Kostensenkung zu erhöhen /94/. Eine wesentliche Rolle spielt hier die Kommunikations- und Informationstechnik. Da hierdurch Informationen über Leistungen von produzierenden Unternehmen zu jeder Zeit an jedem beliebigen Ort zur Verfügung stehen, können Leistungen am Markt oder durch strategische Allianzen schnell und preisgünstig eingekauft werden /78/. So ist eine zunehmende Konzentration der Unternehmen auf ihre Kernkompetenzen zu beobachten /118/, /105/, /17/. Der Nutzen entsteht aus einem Verbund der Besten /116/.

Voraussetzung eines Verbundes der Besten ist die „logistische Durchgängigkeit“ /17/. Darunter versteht man eine wirtschaftliche Materialversorgung der Partner eines Verbundes, um einen unterbrechungsfreien Herstellungsprozeß zu ermöglichen. Das Gesamtziel der Wirtschaftlichkeit umfaßt jedoch die konkurrierenden Ziele „hohe Auslastung“, „niedrige Bestände“, „hohe Termintreue“ und „kurze Lieferzeiten“ /41/, die wiederum ebenfalls für die Bereiche der Partner Zulieferant, Transportunternehmer und Finalproduzent gelten. Die daraus resultierenden Zielkonflikte können dem Gesamtziel im Weg stehen.

So kann der Transportunternehmer, wenn ihm viel Zeit von der Auftragserteilung durch den Zulieferanten bis zum Verbau der gelieferten Module oder Komponenten bleibt, seine Transportmittel besser einplanen. Allerdings liegt dem Zulieferanten ebenfalls daran, diese Zeitpuffer für sich zu nutzen. Ähnliche Zusammenhänge existieren in bezug auf den Zeitkorridor der Materialversorgung. Der Zeitkorridor wird durch den frühest- und den spätestmöglichen Termin einer Anlieferung beschrieben. Ein großer Zeitkorridor ergibt einen großen Handlungsspielraum für Zulieferanten und Transportunternehmer, die sich wiederum untereinander den Spielraum aufteilen müssen. Ebenso bieten große Losgrößen auf der einen Seite die Möglichkeit, Rüstzeiten der Betriebsmittel zu reduzieren, auf der anderen Seite harmonisieren unterschiedlich gewählte Losgrößen in verschiedenen Bereichen nicht. So kann es zu Versorgungsengpässen in der Montage kommen, wenn die Vorfertigung zu große Lose, die Montage hingegen kleine verwendet.

Der Steuerung der Materialversorgung kommt in diesem Umfeld aus konkurrierenden Zielen und Zielkonflikten die Aufgabe zu, zwischen den lokalen Zielen trotz sich rasch ändernder Randbedingungen schnell zu vermitteln /82/. Langfristig heißt das, die Bereitstellung der Ressourcen hinsichtlich von Zeit- und Mengengrößen aufeinander anzupassen. Kurzfristig sollen die Bereiche der Partner durch eine geeignete Steuerung dynamisch abgestimmt

werden. Das *Supply Chain Management* strebt eine solche Synchronisation sämtlicher an der Wertschöpfung beteiligter Prozesse an /106/.

Besonders in der kurzfristigen Steuerung eignet sich Simulation, um die Auswirkungen der hier verwendeten Heuristiken auf das Gesamtziel zu messen. Finalproduzent und Zulieferant setzen bereits seit langem Simulation ein, um Einlaststrategien, Auftragsreihenfolgen und Prioritätsregeln im Hinblick auf ihre Wirtschaftlichkeit zu bewerten /3/, /14/, /28/, /114/, /64/. Transportunternehmen sind hier auf Transportplanungs- und -steuerungssysteme angewiesen /63/, /33/. Legt man die Erfahrungen mit der Simulation aus den Bereichen Finalproduzent und Zulieferant zu Grunde, dann ist auch eine gemeinsame Simulation der Materialversorgung aller Partner vielversprechend, um zwischen Zielen zu vermitteln.

Ziel dieser Arbeit ist es, ein Experimentierfeld aufzubauen, an dem die Partner Finalproduzent, Transportunternehmen und Zulieferant gemeinsam den dynamischen Materialversorgungsprozeß in bezug auf sich ergebende Zielkonflikte untersuchen können. Unter dem Begriff dynamischer Materialversorgungsprozeß soll eine adäquate kurzfristige Steuerung der Materialversorgung verstanden werden. Ließen sich bestehende Simulationssysteme für diese Aufgabe koppeln, dann könnten die Partner weiterhin eigene Simulationssysteme einsetzen und die Simulation verteilt, dezentral an ihren Standorten durchführen. Daraus ergebe sich ein zeitlicher und finanzieller Vorteil, da auf Schulungskosten und einen hohen Modellierungsaufwand verzichtet werden könnte.

Die Entwicklung der *High Level Architecture* (HLA) im Bereich der Telekommunikationstechnik und der militärischen Forschung zeigt, daß bestehende Rechnernetze, wie z. B. das Internet für diese Aufgabe genutzt werden können /37/, /38/, /21/, /22/. Um diese Entwicklung im Bereich der Materialversorgung im Verbund zu nutzen, sind drei Hauptaufgaben abzugrenzen: die Klassifikation der Simulationsdaten, die zwischen den Simulationssystemen ausgetauscht werden, Analyse des Experimentierens am "verteilten Simulationssystem", um Erfahrungen den Partnern schnell zugänglich zu machen, und die Steuerung der Materialversorgung über die Simulationsmodelle des Zulieferanten, Transportunternehmers und des Finalproduzenten hinaus.

Dazu wird zu Beginn der dynamische Materialversorgungsprozeß im Umfeld entstehender Produktionsverbände betrachtet. Der Steuerung kommt eine besondere Bedeutung in diesem Umfeld zu, da hier Termine der Materialversorgung ermittelt, die Ressourcen eingeplant und auf Veränderungen reagiert wird. So führt die Untersuchung klassischer Verfahren zu der Beschreibung von Agenten, die diese Aufgaben in einer verteilten Umgebung übernehmen sollen.

Das Ableiten der Anforderungen an ein Experimentierfeld leitet über zur Bewertung existierender Simulations- und Kommunikationssysteme. Dabei steht die Kommunikation zwischen

den Simulationssystemen im Vordergrund. Darüber hinaus sind für die Steuerung der Materialversorgung Informationen über die aktuelle Belegung von Ressourcen, wie z. B. Freiflächen in der Montage oder freie Kapazitäten eines Lkws, wünschenswert. Daten hierfür liegen verteilt auf Zulieferant, Transportunternehmer und Finalproduzent vor, beziehungsweise müssen hier erhoben werden. So werden Technologien zur Kommunikation in Rechnernetzen dargestellt und ihre Eignung für die verteilte Simulation geprüft.

Darauf aufbauend wird die Grundstruktur einzelner Subsysteme abgeleitet. Subsysteme kapseln Simulationssysteme, die bereits an den Standorten eines Verbundes vorhanden sind. Die Grundstruktur legt fest, wie die einzelnen Subsysteme im Zusammenspiel mit anderen Subsystemen reagieren. Hierfür werden ein Kopplungsmodell und eine Vorgehensweise zur verteilten Simulation dynamischer Versorgungsprozesse konzipiert.

Das Kopplungsmodell ist prototypisch implementiert und wird am Beispiel der Materialversorgungsprozesse aus der Automobilindustrie im Internet getestet. Drei Modelle werden gekoppelt. Dazu werden kommerzielle Simulationswerkzeuge AUTOMOD /5/ und SLX /44/ eingesetzt. So kann jeder Partner in der Materialversorgung mit seinem eigenen System arbeiten, während die Materialversorgung als ganzes verbessert wird. Dadurch wird das Potential einer verteilten Simulation verdeutlicht.

2 Anwendungsfeld

2.1 Materialversorgung

2.1.1 Begriffe und Definitionen

Die Produktion besteht aus einer Kette fortlaufender Handlungen und lässt sich in ein Netz von Teilprozessen zerlegen, die aufeinander aufbauen, sich gegenseitig beeinflussen und letztlich auf die Erreichung des Produktionsziels ausgerichtet sind (Bild 1). SELIGER sieht den technologischen Prozeß als ein Zusammenwirken der drei Komponenten Objekt, Betriebsmittel und Ablauf /90/. Objekte sind Rohstoffe, Teile, Baugruppen und Produkte, die implizit die Aufgabenstellung enthalten. Betriebsmittel sind Komponenten mit Arbeitsvermögen zur Ausführung von Teilprozessen bzw. Vorgängen. Der Ablauf beinhaltet die zeitliche und logische Reihenfolge der Teilprozesse bzw. Vorgänge und bestimmt die parallele und sequentielle Durchführung.

WIENDAHL unterscheidet drei grundlegende Teilprozesse: Montage/Fertigung, Lager und Transport /117/. Das Montieren umfaßt alle Vorgänge, die dem Zusammenbau von Produkten aus Einzelteilen und Baugruppen dienen. Diese Vorgänge werden in Montagesystemen ausgeführt, die jeweils für ein vorgegebenes Produktspektrum ausgelegt sind /101/. In der Fertigung erfahren Objekte eine Wandlung durch die verschiedenen Fertigungsprozesse, wie z. B. durch das Fräsen oder Drehen. Das Lager ist in diesem Sinne ein Objektspeicher. Das Objekt erfährt keine Wandlung und wird in der gleichen Beschaffenheit freigegeben /83/. Der Transportprozeß beinhaltet alle technisch und organisatorisch miteinander verknüpften Vorgänge, bei denen Güter von einem Ausgangspunkt zu einem Ziel bewegt werden.

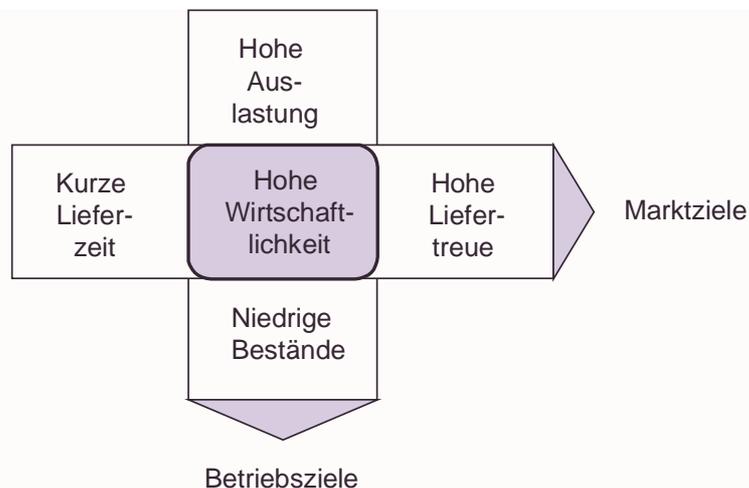


Bild 1: Produktionsziele nach WIENDAHL /113/

Der Materialversorgungsprozeß ist eine Kette aus Prozessen der Produktion, welche die Montage bzw. Fertigung mit Einzelteilen und Komponenten versorgen. Unter dem Begriff Materialversorgungsprozeß soll in dieser Arbeit die Materialversorgung der Montage verstanden werden. Die Montage ist als letztes Glied des Herstellungsprozesses logistischer Orientierungspunkt /89/. Hier werden Materialströme zusammengeführt. Die Nähe der Montage zum Markt erfordert zudem kurze Reaktionszeiten. Daraus folgen kurze Durchlaufzeiten und hohe Termintreue in der Montage bei gleichzeitig niedrigen Beständen und hohen Auslastungen der Ressourcen. Ziel ist es, die Versorgung der Montage mit den richtigen Produkten, in der richtigen Menge und der richtigen Qualität, zur richtigen Zeit am richtigen Ort und zu den richtigen Kosten sicherzustellen.

Bild 2 zeigt den Materialversorgungsprozeß in seinen möglichen Ausprägungen. Innerbetrieblich erfolgt die Versorgung der Montage durch die Vorfertigung bzw. ein Lager (Variante 7 und 8). Außerbetrieblich sind am Materialversorgungsprozeß Zulieferanten und Transportunternehmer beteiligt (Varianten 1 bis 6). Der Transportprozeß kann ein- oder mehrgliedrig aufgebaut sein /46/. Merkmal des eingliedrigen Transportprozesses ist, daß die Transportmittel zwischen Ausgangs- und Empfangspunkt nicht gewechselt werden. Der mehrgliedrige Transportprozeß dagegen beinhaltet einen Wechsel des Transportmittels.

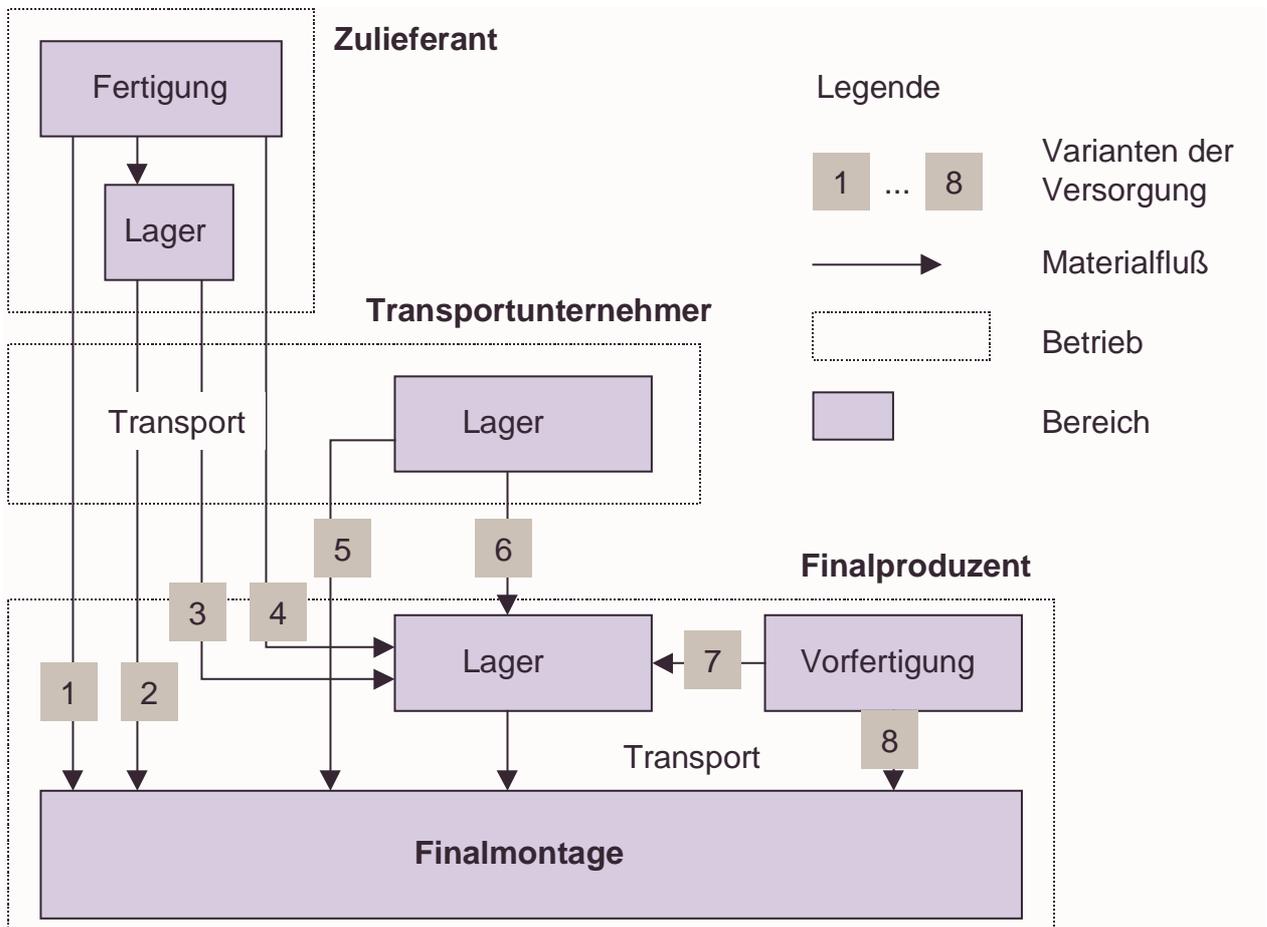


Bild 2: Prozeßvarianten und Partner der Materialversorgung

Weiter kann man den mehrgliedrigen Transportprozeß unterteilen in den gebrochenen und den kombinierten Verkehr. Von gebrochenem Verkehr spricht man, wenn innerhalb des Transportprozesses der Transportbehälter gewechselt wird. Der kombinierte Verkehr dagegen kommt ohne den Wechsel des Transportbehälters aus.

Der externe Transport unterscheidet sich vom internen Transport dahingehend, daß bei diesem wesentlich geringere Distanzen zu überbrücken sind und somit zur Funktionserfüllung nicht Transportmittel, wie z. B. Lkw oder Schleppfahrzeuge, eingesetzt werden. "Als Transportmittel bezeichnet man Betriebsmittel zur Ortsveränderung von Personen und/oder Gütern" /112/.

Für den externen Transport ergeben sich folgende Möglichkeiten:

- *Transport ohne Lagerhaltung (Variante 1):* Bei der Materialversorgung ohne Lagerhaltung findet eine synchrone Belieferung des Finalproduzenten mit den benötigten Gütern statt. Diese Form der Belieferung ist im allgemeinen unter dem Begriff Just-in-Time bekannt. Dabei muß eine exakte Synchronisierung zwischen Zulieferant und Finalproduzent stattfinden. Transport ohne Lagerhaltung eignet sich besonders für Komponenten mit einer niedrigen Vorhersagegenauigkeit und hohem kumulierten Umsatz /119/. Beispiele sind Modul- und Systemlieferanten in der Automobilindustrie. Nachteile dieser Variante für die Partner der Materialversorgung können sich durch Bedarfschwankungen, Verzögerungen auf dem Transportweg, unzuverlässige Transportmittel sowie durch die Abhängigkeit vom Zulieferanten ergeben. Der wichtigste Vorteil liegt in der Verringerung der eigenen Bestände.
- *Transport mit Lagerhaltung beim Zulieferanten (Variante 2):* Die Materialversorgung mit Lagerhaltung beim Zulieferanten stellt für die Finalmontage eine bedarfssynchrone Belieferungsform dar. Der Zulieferant produziert seine Ware auf Lager und versorgt so seinen Kunden. Der Finalproduzent kann je nach Bedarf einen Abruf der Ware starten. Der Vorteil für den Finalproduzenten ist, keine eigene Lagerhaltung zu unterhalten. Der Nachteil entsteht aus der möglichen Lieferunfähigkeit, starken Bindungen an vereinbarte Termine und mangelnden Auslastungen der Transportmittel.
- *Transport mit doppelter Lagerhaltung (Variante 3):* Durch doppelte Lagerhaltung entsteht eine beiderseitige Unabhängigkeit. Der Zulieferant produziert entsprechend den Absprachen mit der Finalmontage in sein Lager und versorgt aus diesem heraus das Lager des Finalproduzenten. Der Finalproduzent erlangt eine Entkopplung seines Verbrauches von der Versorgung und kann Bedarfs- und Lieferschwankungen ausgleichen.
- *Transport mit Lagerhaltung durch die Finalmontage (Variante 4):* Der Zulieferant produziert und liefert einen vereinbarten Bedarf an den Finalproduzenten, welcher allein

verantwortlich für die Deckung seines Bedarfs ist. Der Vorteil liegt in der Unabhängigkeit vom Zulieferanten. Der Nachteil resultiert aus zusätzlichen Lagerkosten.

- *Transport mit externer Lagerhaltung (Variante 5 und 6):* In diesem Fall wird durch einen Transportunternehmer, der mit der Versorgung des Finalproduzenten beauftragt wird, ein Lager unterhalten. Für den Finalproduzenten können Vor- und Nachteile wie beim Transport mit Lagerhaltung entstehen.

Die dargestellten Prozesse Fertigung/Montage, Lager und Transport können weiter detailliert werden, so daß die verschiedenen Prozesse des Handhabens, Förderns, Lagerns und Bearbeitens hinzukommen /107/, /109/. Beispielsweise kann eine Qualitätskontrolle sowohl beim Zulieferanten als auch in der Finalmontage durchgeführt werden.

2.1.2 Zielkonflikte

In der Materialversorgung arbeiten nach Bild 2 in den Varianten 1 bis 6 Finalmontage, Zulieferant und Transportunternehmer und lokal in den Varianten 7 und 8 die Vorfertigung, interner Transport und Finalmontage zusammen. Die Materialversorgung umfaßt also intern wie auch extern drei unabhängige Bereiche: Vorfertigung, interner und externer Transport und Finalmontage. Insofern unterliegen Vorfertigung, Transport und Finalmontage den Zielen „hohe Auslastung“, „niedrige Bestände“, „hohe Termintreue“ und „kurze Lieferzeiten“. Desweiteren kann jeder Bereich als Kunde bzw. Anbieter des anderen Bereichs betrachtet werden. Zwischen den Partnern gilt es also diese Ziele aufeinander abzustimmen, um ein gemeinsames Gesamtziel zu erreichen.

Ziel ist es, die Materialversorgung der Montage mit den richtigen Produkten, in der richtigen Menge und der richtigen Qualität, zur richtigen Zeit am richtigen Ort und zu den richtigen Kosten sicherzustellen. Der Finalproduzent gibt eine Bestellung beim Zulieferanten auf. Beschaffungs-, Liefer- und Bereitstellungstermin muß in Übereinstimmung gebracht werden. Dabei ist der Beschaffungstermin der Zeitpunkt, an dem ein Meldebestand erreicht und eine Bestellung ausgelöst wird, der Liefertermin der Zeitpunkt der Anlieferung und der Bereitstellungstermin der Zeitpunkt der Bereitstellung in der Montage /108/. Bild 3 zeigt vier Abrufvarianten, Liefer-, Fein-, Versandabruf und produktionssynchroner Abruf in bezug auf die Genauigkeitsanforderungen und der Wahl des Beschaffungstermins.

Lange Durchlaufzeiten beim Zulieferanten haben zur Folge, daß Beschaffungstermine weit vor dem Bereitstellungstermin gewählt werden müssen. Das Phänomen von zu langen Durchlaufzeiten und überhöhten Lagerbeständen wird unter dem Begriff Just-in-Time diskutiert. Darunter versteht man die Produktion zum spätest möglichen Zeitpunkt, so daß die Einzelteile und Komponenten gerade noch rechtzeitig fertig werden. Zu jeder Zeit soll auf

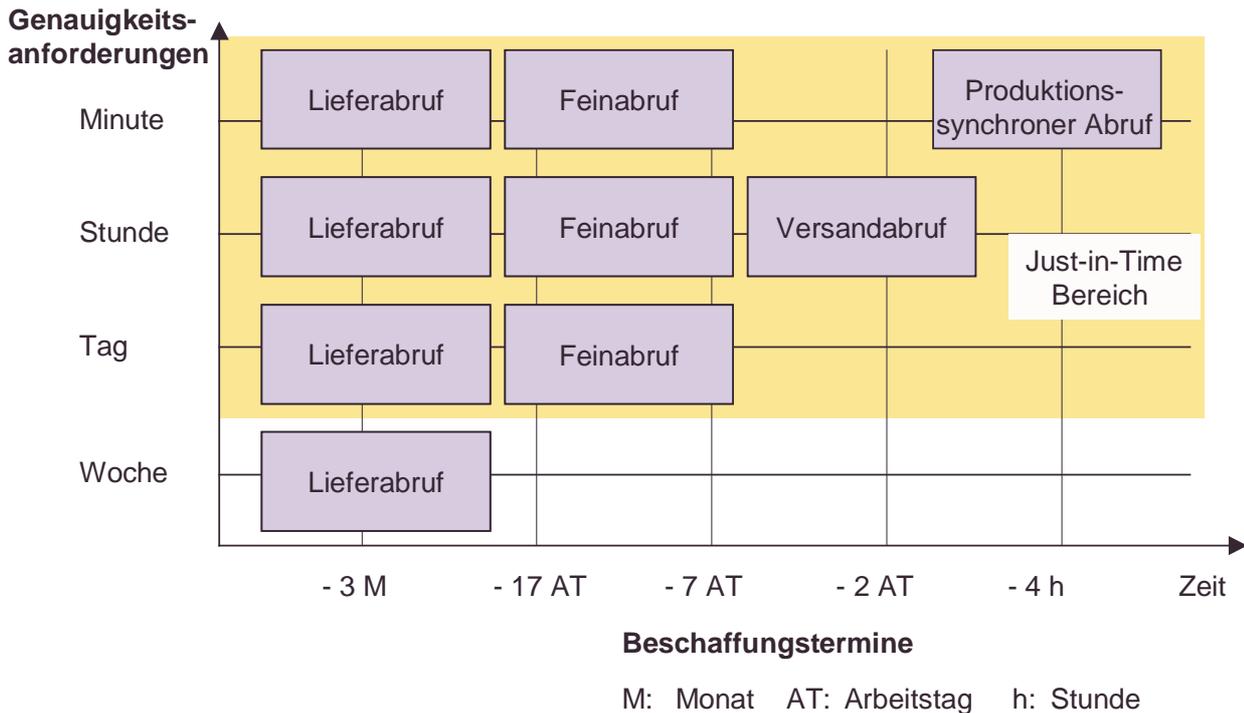


Bild 3: Abrufvarianten /112/

allen Stufen der Produktion gerade soviel beschafft, produziert und verteilt werden, wie unbedingt notwendig /57/. Einer erheblichen Kostenreduktion durch verringerte Lagerbestände steht ein erhöhtes Risiko von Fehlmengen und Stockungen im Produktionsablauf, die sonst durch Puffer in Form von Lager aufgefangen würden, gegenüber. Der Just-in-Time Bereich erstreckt sich von einer Tages genauen Materialversorgung bis hin zu einer minutengenauen Materialversorgung. Um hier eine genauere Abstimmung zwischen den Partnern zu erreichen werden weitere Abrufe eingeführt.

OHNO, Begründer des Just-in-Time Konzepts, versteht zudem unter Just-in-Time die völlige Beseitigung von Verschwendung in der Produktion /71/. Bestände verdecken Fehler in der Planung der Versorgung. Werden Bestände gesenkt, so treten die Fehler zu Tage und müssen beseitigt werden. Durch eine konsequente Abstimmung aller beteiligten Bereiche, wie Fertigung, Transport und Finalmontage, sollen ungenutzte Potentiale freigelegt werden. So gesehen, gehen Begriffe wie *Supply Chain Management* oder *Lean Production* mit der *Just-in-Time* Philosophie eng einher.

Bild 4 veranschaulicht diese Beziehungen mit den sich ergebenden Zielkonflikten. Dafür wurden Zielfunktionen in bezug auf Termin, Genauigkeit und Stückzahl aufgestellt und die Richtungen der Veränderungen bei den Partnern angegeben. Ein hoher Zielwert bedeutet „gut“, ein niedriger „schlecht“ für den jeweiligen Partner.

Durch einen Abruf der Komponenten weit im Voraus ohne kurzfristige Änderungen kann der Zulieferant eines Finalproduzenten seine Wirtschaftlichkeit verbessern. Deshalb ist der

Zielwert für den Zulieferanten „gut“ je weiter der Beschaffungstermin von dem Bereitstelltermin entfernt ist. Aus der Montage hingegen ist aufgrund der Nähe zum Markt eher mit kurzfristigen Änderungen der Komponenten zu rechnen. Gründe hierfür können Prozeßunsicherheiten, aber auch Änderungen im Produkt sein. Beispielsweise rechnet ein Zulieferant in der Automobilindustrie mit Schwankungen zwischen 500 und 2500 Stück pro Tag /51/. Daher steigt der Zielwert für den Finalproduzenten je weiter der Beschaffungstermin an den Bereitstelltermin heranrückt. Ebenso kann der Transportunternehmer auf der einen Seite, wenn ihm viel Zeit bis zum Bereitstellungstermin bleibt, seine Transportmittel besser einplanen. Dem Zulieferanten auf der anderen Seite liegt daran, diese Zeitpuffer für sich zu nutzen.

Ähnliche Zusammenhänge existieren in bezug auf die Genauigkeit. Hierunter soll das Versorgungsfenster verstanden werden, daß den Transportunternehmern seitens des Finalproduzenten eingeräumt wird. Das Versorgungsfenster legt die Toleranzen einer Abweichung des Liefertermins fest. Große Toleranzen ergeben einen größeren Spielraum für Zulieferant und Transportunternehmer, die sich wiederum untereinander den Spielraum aufteilen müssen. Deshalb ist der Zielwert für den Finalproduzenten gut je besser der Liefertermin vom Transportunternehmer eingehalten werden kann.

Ein weiterer Zielkonflikt liegt in der Stückzahl der Materialversorgung. Große Losgrößen bieten einerseits die Möglichkeit, Rüstzeiten der Betriebsmittel zu reduzieren, andererseits harmonisieren unterschiedlich gewählte Losgrößen in verschiedenen Bereichen nicht. So kann es zu Versorgungsengpässen in der Montage kommen, wenn die Vorfertigung zu gro-

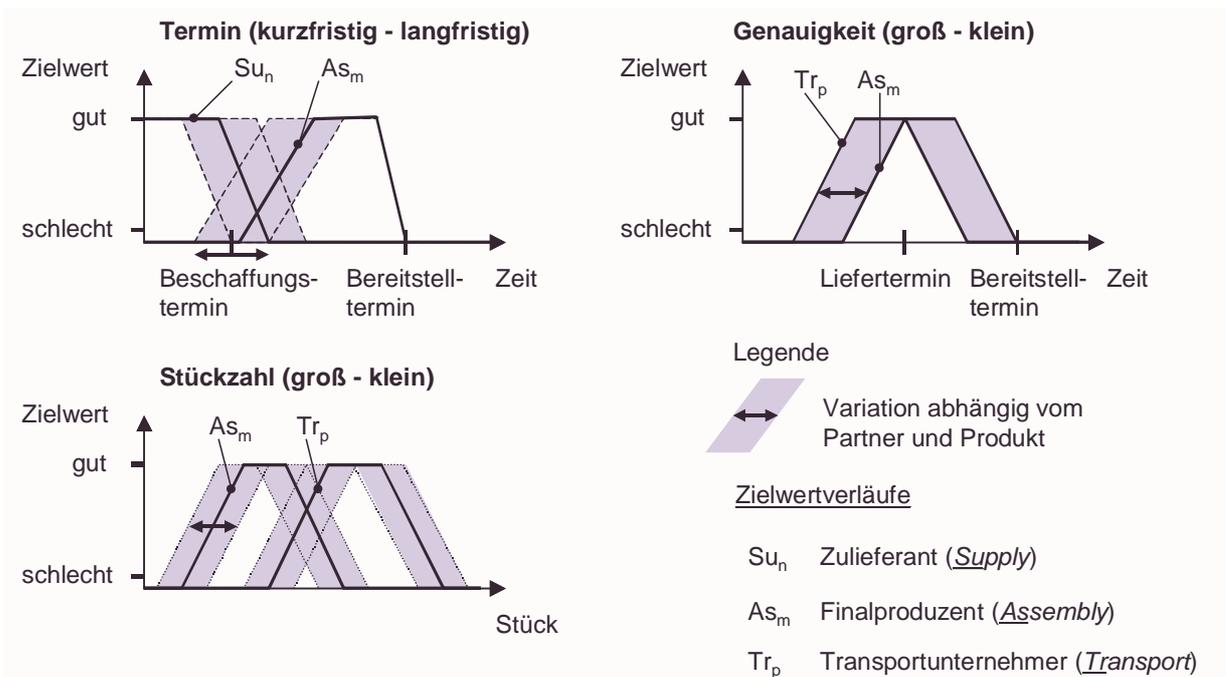


Bild 4: Zielkonflikte in der Materialversorgung

ße Lose, die Montage hingegen kleine verwendet.

Ebenso mag der Transportunternehmer große Stückzahlen bevorzugen, um Be- und Entladevorgänge und längere Fahrzeiten zu reduzieren, welches zu Ungunsten der Zulieferanten oder der Finalmontage geht, da dieses gleichsam lange Liegezeiten und hoher Bestand in den Lagern bedeutet.

Erschwerend wirkt, daß Markt- und Betriebsziele (Bild 1) nicht komplementär, sondern teilweise konkurrierend zu einander sind. So mag eine hohe Auslastung der Betriebsmittel dadurch erreicht werden, daß immer genügend Material im Bereitstellungspuffer zur Verfügung steht. Bestände werden höher. Gleichzeitig bedeutet eine hohe Auslastung, daß unter Umständen Termine nicht eingehalten werden können, da keine Betriebsmittel zur Verfügung stehen oder Störungen im Ablauf nicht aufgeholt werden können. Den Zusammenhang zwischen „hohe Auslastung“ und „kurze Lieferzeiten“ bezeichnete GUTENBERG als Dilemma der Ablaufplanung. Das Dilemma liegt in der Wirkkette „hohe Auslastung“, „hohe Bestände“, „lange Liegezeiten“, „hohe Lieferzeiten“ /41/. Das Erreichen einer hohen Auslastung führt also zwangsweise zu einer höheren Lieferzeit.

Ein weiterer Punkt, der sich erschwerend auswirkt, sind sich dynamisch ändernde Situationen. Eine Schlüsselstellung haben hier Störungen. Das sind Ereignisse, die unerwartet eintreten und eine Unterbrechung bzw. Verzögerung eines Prozesses zur Folge haben. Herstellungs- und Materialfehler, Abnutzungserscheinungen und zufallsbedingte Störungen schränken die Laufdauer technischer Systeme ein. Bei komplexen technischen wie auch organisatorischen Systemen wird es immer zu Störungen kommen. Störungen schränken die Verfügbarkeit von Systemen ein.

Der Begriff Planung der Materialversorgung umfaßt alle Aktivitäten, die darauf ausgerichtet sind, eine adäquate Gestaltung und wirtschaftliche Umsetzung der Materialversorgung zu gewährleisten. Dabei orientiert sich die Definition an der Definition Produktionsplanung nach SPUR /102/. Die Steuerung beinhaltet alle planenden Aktivitäten, deren Durchsetzung und Überwachung im Betrieb. Vielfach wird hierfür auch der Begriff Produktionsplanung und -steuerung (PPS) verwendet. Planung heißt in diesem engeren Fall, den Produktionsablauf und die Rahmenbedingungen für eine bestimmte Zeit im Voraus zu planen, während die Steuerung die vorausgegangene Planung trotz im Betrieb unvermeidbarer Störungen aufrecht erhält.

Ohne eine geeignete Steuerung wird zwangsläufig damit zu rechnen sein, daß es immer wieder zu Konflikten in der Materialversorgung kommt.

2.2 Steuerung

2.2.1 Zentrale Verfahren

Das Auflösen von Zielkonflikten setzt hohe Anforderungen an die anzuwendenden Steuerungsverfahren. Die Hauptaufgaben der Steuerung beschreibt das Aachener PPS Modell (Bild 5). Das Modell gibt eine Gliederung der Kernaufgaben mit den eigentlichen Steuerungsfunktionen wieder. Es muß Menge, Art und Termine für die einzelnen Bereiche festgelegt werden. Dabei muß davon ausgegangen werden, daß Ressourcen nicht unbegrenzt über die Zeit zur Verfügung stehen. Diese Zuordnungsaufgaben gehören zu den NP-vollständigen Problemen, d.h. der Lösungsaufwand steigt exponentiell zu der Problemgröße. Beispiele sind das Flow-Shop- und Job-Shop-Modell. Für n Aufträge und m Maschinen ergeben sich $(n!)^m$ alternative Maschinenbelegungspläne.

In zentralen Verfahren der Steuerung gibt es eine Hierarchie der Steuerungssysteme, die Steuerungsbefehle für alle Betriebe, Bereiche und Betriebsmittel generieren. Um die damit verbundene Komplexität zu beherrschen, kommen in der Praxis Sukzessivplanungsverfahren zum Einsatz. Das Prinzip basiert darauf, daß hintereinander verschiedene Planungsschritte abgearbeitet und in weiteren Schritten miteinander abgestimmt werden. Die Schritte im einzelnen sind Produktionsprogrammplanung, Produktionsbedarfsplanung, Eigenfertigungsplanung und -steuerung bzw. die Fremdbezugsplanung und -steuerung.

Das am weitesten verbreitete Verfahren zu Steuerung ist das *Manufacturing Resource Planning* (MRP II). Der Ursprung des Verfahrens (MRP II) liegt in dem Anfang der 60 Jahre entwickelten *Material Requirement Planing* Verfahren (MRP I), das eine rein mengenbezo-

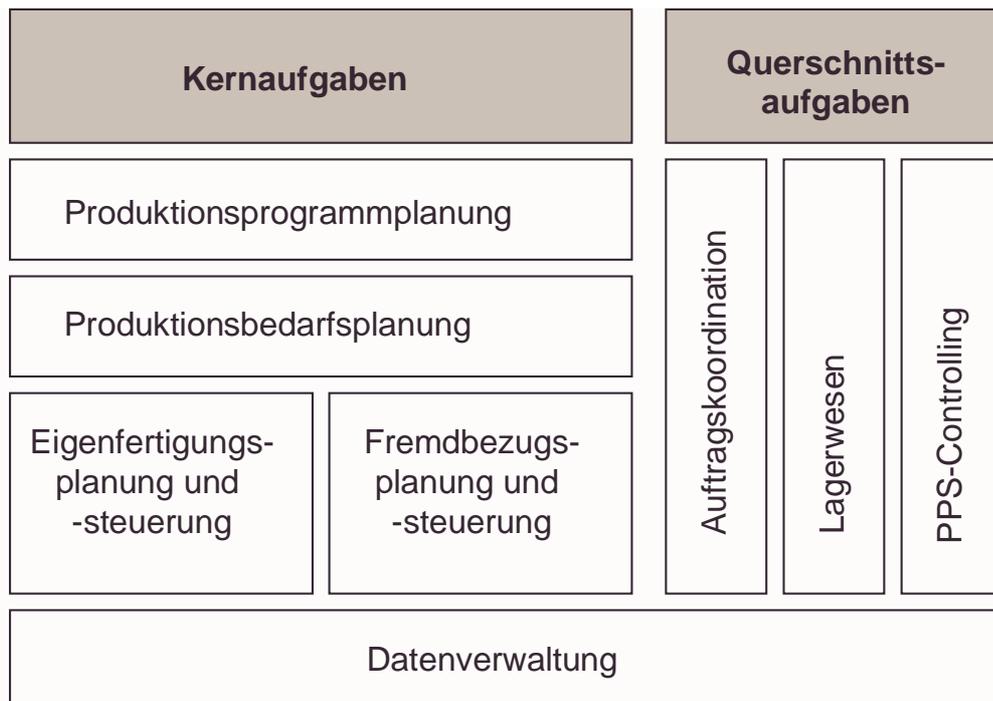


Bild 5: Aufgaben der Produktionsplanung und -steuerung /87/

gene Betrachtung (Bedarfsplanung) beinhaltet. Um eine Abstimmung von Menge und Kapazitäten erweitert fand dieses Verfahren Einzug in nahezu allen gängigen PPS-Systemen /87/. Die Zielsetzung von MRP II liegt in der Abstimmung von abzusetzenden Produkten mit der Produktionskapazität, so daß eine hohe Kapazitätsauslastung erreicht werden kann. Es wird mit zunehmendem Detaillierungsgrad bei abnehmendem Planungshorizont geplant.

Die Verteilung der Aufträge sieht eine „relativ strenge Hierarchie“ vor. Übergeordnete Steuerungssysteme geben Steuerungsbefehle an verschiedene Standorte oder Werkstätten weiter, die dann diese Steuerungsbefehle für die Arbeitsplätze detaillieren. Analog dieser Struktur folgt auch die Aufteilung des Planungswissens vom Planungsingenieur bis zum Facharbeiter /1/. Ergebnisse übergeordneter, längerfristig planender Instanzen sind die Eingangsdaten für untergeordnete Instanzen, die mit kurzfristigerem Horizont planen.

In der Produktionsprogrammplanung wird eine Prognose aller Produkte nach Menge und Terminen errechnet. Der Planungshorizont beträgt 0,5 bis 2 Jahre. In der darauffolgenden Materialbedarfsplanung werden mittelfristig die Sekundärbedarfe an Komponenten und Rohmaterial festgelegt. Die Sekundärbedarfe werden von den Partnern in einem Verbund gedeckt. Hierfür werden Fertigungsaufträge (Eigen- oder Fremdbezug) generiert. Ausgehend von den Fertigungsaufträgen erfolgt eine grobe Einteilung der Ressourcen. Fertigungsaufträge werden bis auf Arbeitsplatzebene aufgelöst und der Fertigung vorgegeben /69/, /120/. Die Rückkopplungen zwischen den Stufen erfordern rechenintensive Neplanungsläufe. Die Aktualisierung der Daten erfolgt höchstens täglich, meist jedoch alle zwei bis fünf Tage /36/.

Werden Aufträge früher in das System eingelastet und dabei die Ressourcen bei der Steuerung nicht hinreichend berücksichtigt, tritt das Phänomen geringer Liefertreue auf. Das führte zur Entwicklung der Belastungsorientierten Auftragsfreigabe (BOA). Dieses ist ein Verfahren zur kapazitätsorientierten Auftragsfreigabe. Das Hauptziel der Belastungsorientierten Auftragsfreigabe stellen kurze Durchlaufzeiten und deren geringe Streuung dar /113/. Um das Freigabeverfahren überhaupt anwenden zu können, ist es notwendig, daß Aufträge nach Art, Menge, Losgröße und Endtermin bekannt sind und feststehen. Zusätzlich sind Arbeitspläne mit aktualisierten Plandurchlaufzeiten erforderlich. Diese müssen durch ein vorhandenes, übergeordnetes Dispositionssystem festgelegt werden /69/. Ihr Anwendungsbereich hinsichtlich der Fertigungsarten reicht von der Einmalfertigung bis hin zur Serienfertigung, liegt vorwiegend jedoch in der Einzel- und Kleinserienfertigung. Die Variantenvielfalt der zu produzierenden Teile kann sehr groß sein.

Das übergeordnete System ist für eine grobe Kapazitäts-, Mengen- und Terminabstimmung zuständig, wie sie in MRP Systemen gegeben ist. Die Belastungsorientierte Fertigungssteuerung wird also immer in Verbindung mit einem PPS-System eingesetzt. Sie beinhaltet keine Bereitstellungsplanung, Produktionsprogrammplanung, Lieferterminabstimmung,

Kundenauftragsverwaltung, Mengenplanung sowie Kapazitätsanpassung. Außerdem ist die Durchführung einer Material-, Vorrichtungs- und Werkzeugverfügbarkeitsprüfung notwendig, denn freizugebende Aufträge müssen auch tatsächlich bearbeitet werden können, sobald die entsprechende Kapazität frei wird. Diesbezüglich ist eine enge Verknüpfung mit der Beschaffung erforderlich /47/.

Auf der strategischen und taktischen Ebene kommen also mächtige Planungsalgorithmen zum Einsatz, während auf der operativen Ebene nur einfache Algorithmen verwendet werden, wie z. B. Prioritätsregeln zum Abarbeiten von Warteschlangen. Prioritätsregeln dienen dazu, am Arbeitssystem, Reihenfolgen für die Bearbeitung von Aufträgen festzulegen. Dafür erhält jeder Auftrag eine Prioritätszahl, die ein Ordnen der Aufträge ermöglicht. Eine Regel allein trifft die Situation in komplexen Versorgungsprozessen allerdings selten. Beispielsweise führt die First-In-First-Out (FIFO)-Regel nicht zu den gewünschten Ergebnissen, wenn ein bereits verspäteter Auftrag vorgezogen werden muß. Eine Verbesserung kann durch die additive Verknüpfung der Regeln erreicht werden. Mit Hilfe solcher Heuristiken soll ein zielgerichtetes Handeln auf operativer Ebene möglich werden.

Vorgestellte Verfahren eignen sich vor allem zur Steuerung innerhalb der Bereiche der Materialversorgung. So benötigen Sukzessivplanungsverfahren einen hohen Abstimmungsaufwand zwischen den Partnern, der ohne zusätzliche Kommunikationshilfen nicht durchführbar ist. Des weiteren ist eine vollständige Abbildung des Produktionsverbundes beispielsweise mit Hilfe der BOA aus Gründen der Komplexität nicht praxisrelevant. Daher besteht ein Bedarf an dezentralen Verfahren.

2.2.2 Dezentrale Verfahren

2.2.2.1 Fremdbezugssteuerung

Parallel zur Eigenbedarfsplanung und -steuerung erfolgt die Steuerung des Fremdbezugs. Zur langfristigen Steuerung gehört, Angebote über zu beziehende Komponenten einzuholen und die Zulieferanten auszuwählen. Kurzfristig wird auf bewährte Zulieferanten zurückgegriffen. Durch den Abruf der Komponenten beim Zulieferanten wird die Materialversorgung angestoßen. Hier schließt sich der Kreis zu den Verfahren zur Steuerung innerhalb der Bereiche. Ein Lieferabruf stößt eine Abfolge von Prozessen in der Materialversorgung an, deren Steuerung wieder durch ein obengenanntes Verfahren durchgeführt wird. Die traditionelle Fremdbedarfssteuerung basiert auf der Vorgabe von Terminen und Mengen.

Ein Konzept, das darauf abzielt, die Steuerung zwischen Herstellern und Zulieferanten zu verbessern, ist das Fortschrittszahlenkonzept, welches ursprünglich für die Automobilindustrie entwickelt wurde. Der Grundgedanke ist, eigene Produktionsstufen und die der Zuliefer-

anten mit einem Minimum an Daten über den Bedarfsverlauf zu informieren. Das Fortschrittszahlenkonzept erfordert eine eindeutige Untergliederung des gesamten Produktions- und Beschaffungsbereichs in voneinander abhängige Teilsysteme. Diese werden als Kontrollblöcke bezeichnet und stellen weitgehend autonome, selbststeuernde Organisationseinheiten dar. Die Feinsteuerung wird somit an die Kontrollblöcke abgegeben. Jeder Kontrollblock erfordert die zentrale Vorgabe einer Soll-Fortschrittszahl sowie die Rückmeldung der entsprechenden Ist-Fortschrittszahl an die Zentralstelle. Eine Fortschrittszahl ist eine kumulierte Mengengröße bezogen auf einen bestimmten Zeitpunkt. So gibt es Fortschrittszahlen für Material, Teile, Baugruppen, Module und Systeme.

Werden alle Fortschrittszahlen aller Kontrollblöcke in ein Diagramm über die Zeit eingetragen, so wird daraus der jeweilige Bestand und die Durchlaufzeit der Kontrollblöcke deutlich /87/. Jeder Bereich kann anhand dieser Diagramme seine Kapazitäten einplanen. Sind die Auswirkungen von Aufgaben auf die Fortschrittszahlen den Werkern bekannt, können dezentral Aufgaben selbständig durch die Werker übernommen werden. Muß allerdings ein Bauteil ablaufbedingt zu einem späteren Zeitpunkt noch einmal einem früheren Fertigungsschritt unterzogen werden, wie z. B. die Durchführung eines weiteren Bohrprozesses, so würde dies eine unerlaubte Verflechtung der Kontrollblöcke bedeuten. In diesem Fall wäre entweder ein weiterer Kontrollblock erforderlich, oder der Kontrollblock müßte entsprechend so vergrößert werden, daß alle im Fertigungsprozeß dazwischen liegenden Arbeitsschritte bzw. Betriebsmittel darin enthalten wären. Es ist also notwendig, daß die Kontrollblöcke eine lineare Struktur aufweisen, da zwischen einzelnen Kontrollblöcken keine gegenseitigen Verflechtungen bestehen dürfen. Der Leistungsaustausch darf nur in Richtung des Produktionsfortschritts erfolgen. So eignet sich dieses Konzept vor allem für die Fließfertigung in der Großserie und der Kfz-Zulieferindustrie.

2.2.2.2 Kanban

Ein anderes dezentrales Verfahren ist die Kanbansteuerung. In der Kanbansteuerung wird davon ausgegangen, daß sich Planvorgaben zyklisch wiederholen. Die Kanbansteuerung erfordert also einen stetigen Teilverbrauch mit geringen Bedarfsschwankungen und einem hohen Wiederholfaktor. Unter diesen Voraussetzungen ist es jedoch möglich, langfristig den Produktionsablauf im Voraus zu planen und dessen Durchführung sich selbst zu überlassen /119/. Wesentliches Merkmal ist dabei die Einführung des Hol-Prinzips. Ähnlich wie in einem Warenhaus soll der Verbraucher sich Materialien und Teile selbsttätig zum richtigen Zeitpunkt in der benötigten Menge beschaffen. Die durch die Entnahme fehlende Menge soll unverzüglich wieder aufgefüllt werden. Dies soll durch Beteiligung der ausführenden Mitarbeiter an der kurzfristigen Steuerung erreicht werden.

Die Kanban-Prinzipien wurden bereits Ende der sechziger Jahre von der Toyota Motor Company in Japan entwickelt. Ziele sind die Reduktion der Bestände und eine hohe Termineinhaltung /57/. So wird eine lagerbestandslose Fertigung mit ständiger Materialverfügbarkeit angestrebt. Die Zielerfüllung hinsichtlich niedriger Durchlaufzeiten folgt aus den beabsichtigten niedrigen Beständen. Aus den genannten Voraussetzungen folgt bezüglich der Fertigungsart eine Serien- bis Massenfertigung /40/.

Bild 6 zeigt einen Kanbanregelkreis. Zwei Arbeitssysteme sind hier über ein Transportsystem miteinander verbunden. Ausgangspunkt ist der verbrauchende Bereich. Hier meldet ein Mitarbeiter einen Verbrauch mit Hilfe des Transportkanbans (1) und (2) an. Im Lager des vorangehenden Arbeitssystems wird ein Produktionskanban von einem vollen Behälter mit den geforderten Komponenten entfernt und durch einen Transportkanban ersetzt (3). Der Produktionskanban kommt in die Sammelbox für Produktionskanbans (4) und der leere Behälter wird durch das Transportsystem dem Arbeitssystem zur Verfügung (8) gestellt. Der volle Behälter wird zum verbrauchenden Arbeitssystem (5) und (6) transportiert. Produktionskanbans im Sammelbehälter lösen Produktionsaufträge (7), leere Behälter werden so wieder aufgefüllt (9) und ins Lager (10) und (11) gebracht.

Da die Behälter Standardmengen enthalten, dürfen keine Ausschussteile produziert werden. Diese würden den Behälterinhalt verringern und die Funktionsfähigkeit nachfolgender Regelkreise durch Versorgungsengpässe stören. Die Voraussetzung nur Gutteile zu produzieren, erfordert ein hohes Qualitätsbewußtsein der Mitarbeiter. Als Auftragsauslösungsart

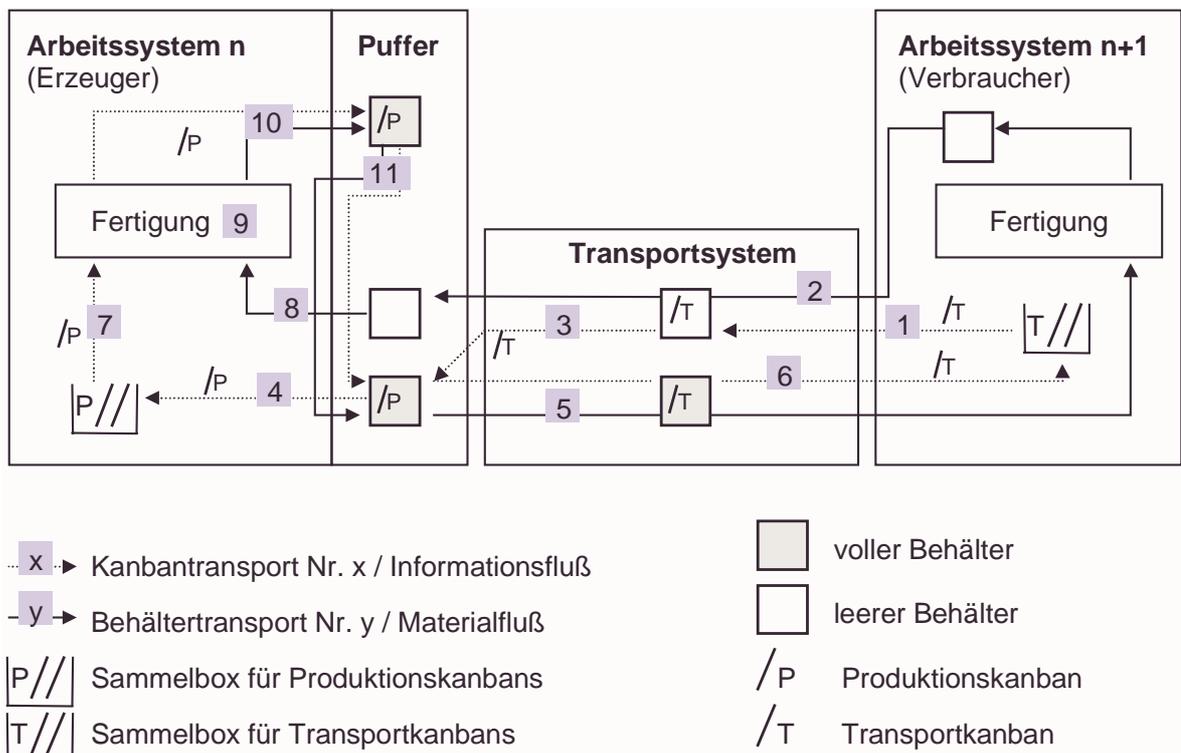


Bild 6: Kanban Regelkreis

sind Produktion auf Bestellung mit Einzelaufträgen, Rahmenaufträge sowie Produktion auf Lager möglich. Die Anwendung der Kanbansteuerung ist auch im überbetrieblichen Bereich möglich: Es können Regelkreise zwischen Zulieferanten und Finalmontage oder zwischen Lager und Verkaufsstelle eingerichtet werden.

Die Kanbansteuerung kann bei ein- und mehrteiligen Erzeugnissen mit einfacher bis komplexer Struktur angewendet werden. Die Fertigungstiefe kann gering bis mittel sein. Ist sie zu groß, steigen die Umlaufbestände. Die Variantenvielfalt sollte klein sein. Außerdem sind Möglichkeiten der Teile- und Baugruppenstandardisierung erforderlich, um der Forderung nach regelmäßigem und konstantem Verbrauch besser nachkommen zu können.

Generell läßt sich feststellen, daß aufeinanderfolgende Arbeitssysteme nahe beieinander liegen sollten. Jedem Arbeitssystem sind nahe Ein- und Ausgangspufferlager zuzuordnen. Wichtig ist eine sehr gute Kapazitätsabstimmung der Arbeitssysteme untereinander, da die Pufferlager lediglich dem Ausgleich von Störungen dienen. Es darf im gesamten Produktionsbereich keine Arbeitssysteme geben, an denen Engpässe auftreten. Für störungsbedingte Engpässe sind Ausweichmaschinen vorzuhalten. Verfügbarkeit und Flexibilität der Betriebsmittel müssen sehr hoch sein, um maximale Störungsfreiheit zu gewährleisten. Die hohe Flexibilität ist trotz des hohen Wiederholfaktors sinnvoll, da im Fall von Maschinenausfällen ein Ausweichen auf eine andere Maschine innerhalb des Arbeitssystems ermöglicht wird. Außerdem kann mit Einzweckmaschinen weniger flexibel auf Nachfrageschwankungen unterschiedlicher Teile reagiert werden.

Mit Ausnahme der Kanban-Steuerung bieten die beschriebenen Verfahren keine ausreichende Unterstützung der operativen Ebene bei der Steuerung der Materialversorgung, da die Transportsteuerung nicht ausreichend berücksichtigt wird. Dementsprechend ist eine zentrale Steuerung mehrerer kooperierender Partner in der Materialversorgung nicht angebracht, da es zentrale Eingriffe in die jeweiligen Systeme der Partner erfordern würde, welche nicht erwünscht sind. Die Kanban-Steuerung entspricht zwar dem Just-in-Time Prinzip, ist jedoch nicht für Systeme mit einer hohen Variantenvielfalt und hohen Schwankungen in der Abrufmenge anwendbar.

2.2.2.3 Agentengesellschaften

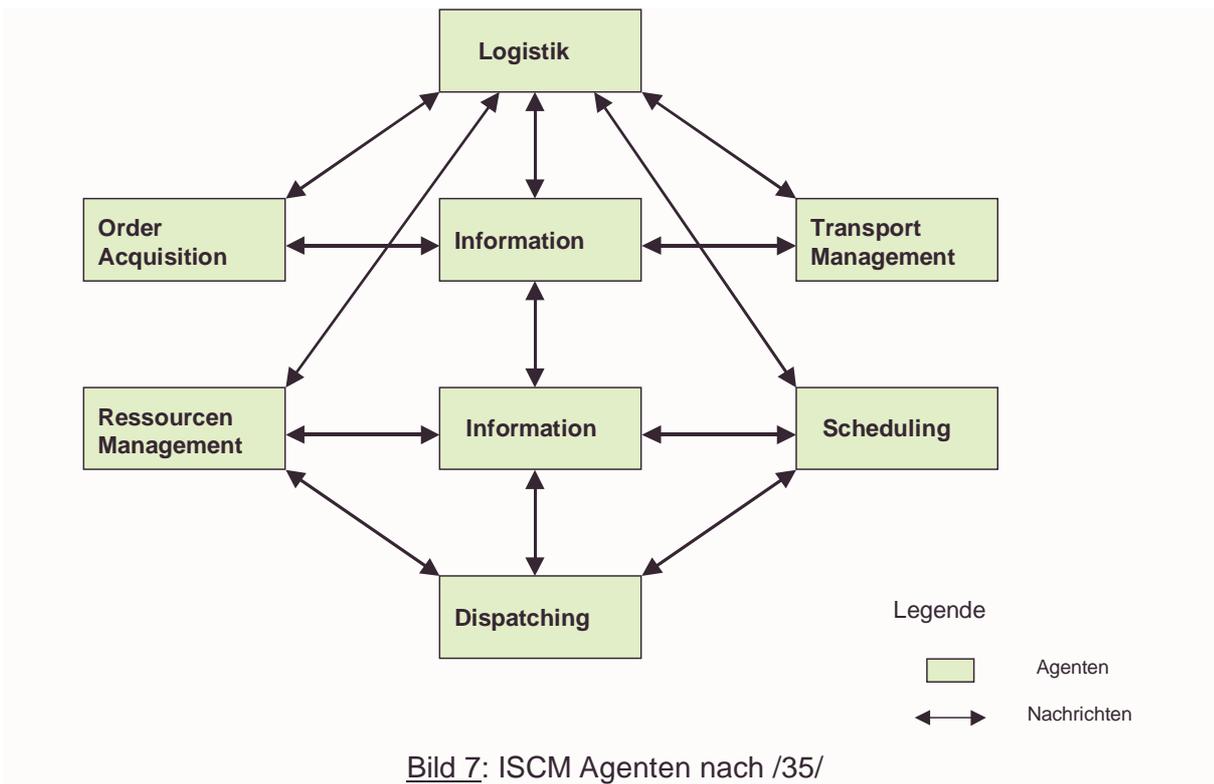
Eine neue Art der Steuerung soll mit sogenannten Agentensystemen oder Agentengesellschaften erzielt werden. Agenten sind Computerprogramme, die mit Planungsalgorithmen ausgestattet sind /6/. Neben einer Wissensbasis haben Agenten, die Fähigkeit miteinander zu kommunizieren. Art und Weise der Kommunikation wird durch Kommunikationsregeln festgelegt.

Agenten lassen sich zu Agentengesellschaften zusammenfassen, in der jeder Agent seine zugeordnete Aufgabe erfüllt. Entsprechend den bestehenden Koordinationsformen lassen sich drei Arten von Gesellschaften unterscheiden: die hierarchische, die föderalisierte und die autonome Form.

In der hierarchischen Form werden Aufgaben analog zu den bestehenden Strukturen verteilt. Das bedeutet, daß Agenten Planungswerkzeuge, wie PPS Systeme, kapseln. So gibt es beispielsweise Agenten, die für Maschinenbelegungspläne verantwortlich sind. Es existiert also eine zentrale Planungsinstanz, die an die unteren Ebenen Steuerungsbefehle weitergibt, die einen mehr oder weniger großen Handlungsfreiraum lassen /95/, /34/.

Ein Beispiel ist der Integrierte Supply Chain Management (ISCM) Ansatz von FOX et al. /35/. Die Autoren gehen davon aus, daß für die Planung und Steuerung bereits alle nötigen Algorithmen und Verfahren, wie die genannten BOA oder das Fortschrittszahlenkonzept, existieren und nur noch in den gegenwärtigen MRP Systemen implementiert werden müssen. Um eine dynamische Rekonfiguration der Wertschöpfungskette aufgrund sich ändernder Randbedingungen zuzulassen, ist das Abstimmen der Planungsdaten zwischen den Systemen einer Wertschöpfungskette notwendig. Hierfür entwickelten die Autoren eine Agentengesellschaft, in der die Rollen analog der Funktionen des MRP Systems gegliedert sind. Bild 7 zeigt die Agenten aus diesem Ansatz. Es gibt zwei Gruppen von Agenten. Die sogenannten funktionalen Agenten übernehmen Aufgaben wie das Planen und Steuern von Prozessen in der Wertschöpfungskette. Die Informationsagenten haben eine unterstützende Aufgabe. Die funktionalen Agenten können wie folgt beschrieben werden:

- Vertriebsagent (*Order Acquisition Agent*): Dieser Agent steht mit dem Kunden in Kontakt, verhandelt Preise und Endtermine. Änderungen werden direkt an den Logistikagenten weitergeleitet.
- Logistikagent (*Logistics Agent*): Er ist verantwortlich für die gesamte Verteilung der Aufträge auf die einzelnen Standorte und koordiniert den Materialfluß in der Wertschöpfungskette.
- Transportagent (*Transport Agent*): Dieser Agent übernimmt die Zuordnungsaufgabe von Transportaufträgen zu Transportmitteln und deren Steuerung. Beispielsweise legt er für die Komponenten bei den Zulieferanten fest, wann welche Komponenten mit welchem Transportmittel abgeholt und zur Finalmontage gebracht werden. Die Aufträge erhält er direkt vom Logistikagenten.



- Planungsagent (*Scheduling Agent*): Der Planungsagent übernimmt die Aufgabe, Terminpläne zu generieren und sie an den Durchsetzungsagenten weiterzugeben. Dabei ordnet er Ressourcen und Startzeiten den Operationen zu, so daß ein Plan entsteht, der hinsichtlich des *Work in Process* (WIP) und Verspätungen optimal ist. Vom Durchsetzungsagenten erhält er Terminabweichungen. Von den Ressourcenagenten werden Ausfälle an ihn weitergeben. Vom Logistikagenten erhält er die Auftragsanfragen.
- Ressourcenagent (*Resource Management Agent*): Er verwaltet die Ressourcen für einen Plan. Ressourcen werden dynamisch für einen Auftrag reserviert, damit der Beginn der Bearbeitung eingehalten werden kann. Gleichzeitig hält der Agent einen Überblick über Zulieferanten und die intern zur Verfügung stehenden Ressourcen.
- Steuerungsagent (*Dispatching Agent*): Dieser Agent übernimmt die Auftragsfreigabe und die Steuerung. Abweichungen vom Plan teilt er dem Planungsagenten mit, damit der Plan repariert wird.

Es wird deutlich, daß dieser Ansatz sich an bestehende Strukturen in der Produktion anpaßt. Funktionen oder Module eines MRP Systems werden durch Agenten gekapselt. Einen ähnlichen Ansatz wählt auch STIEFBOLD /104/.

Die Güte der beschriebenen Systeme steht und fällt mit den verwendeten Planungsalgorithmen. Da das Problem, eine Anzahl von Aufträgen auf Ressourcen zu verteilen, sehr komplex ist, gehen beispielsweise FISCHER /32/, /33/, MERTENS /63/, ZELEWSKY /121/, SHEN und NORRIE /95/ dazu über, dem Markt angepaßte Vorgehensweisen zu implementieren.

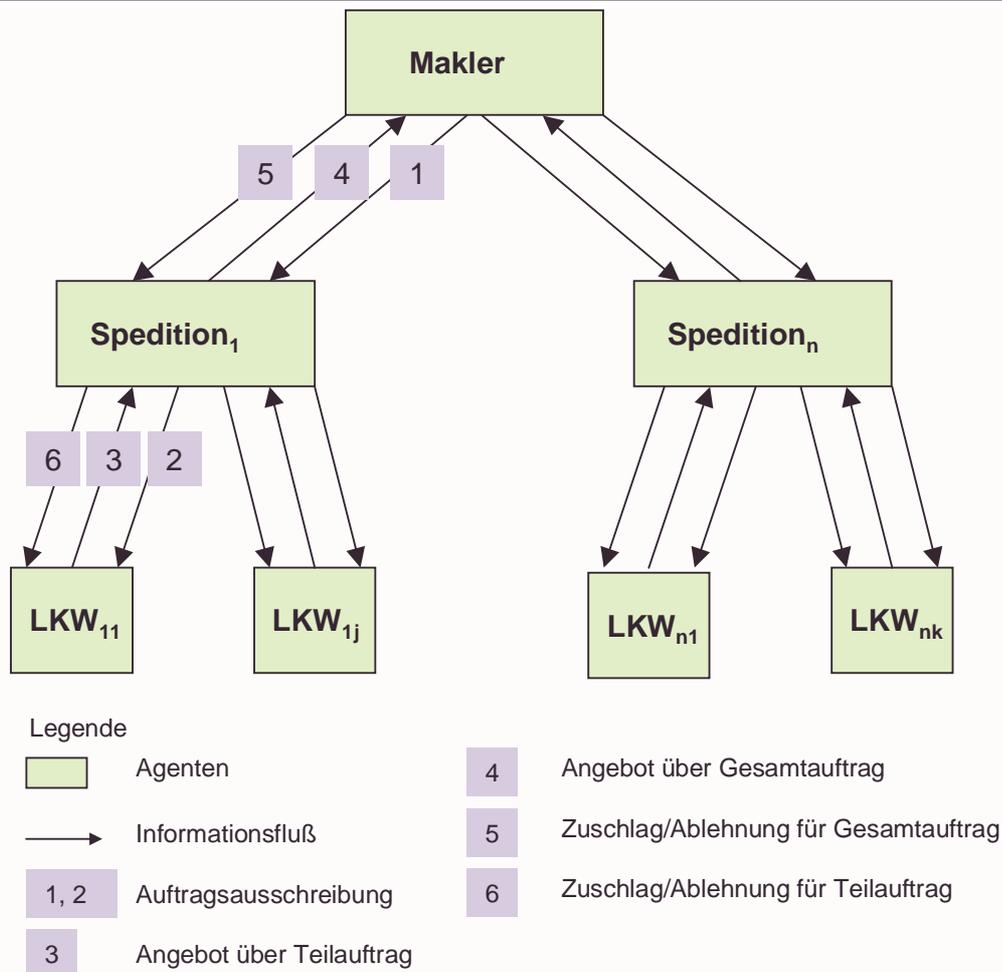
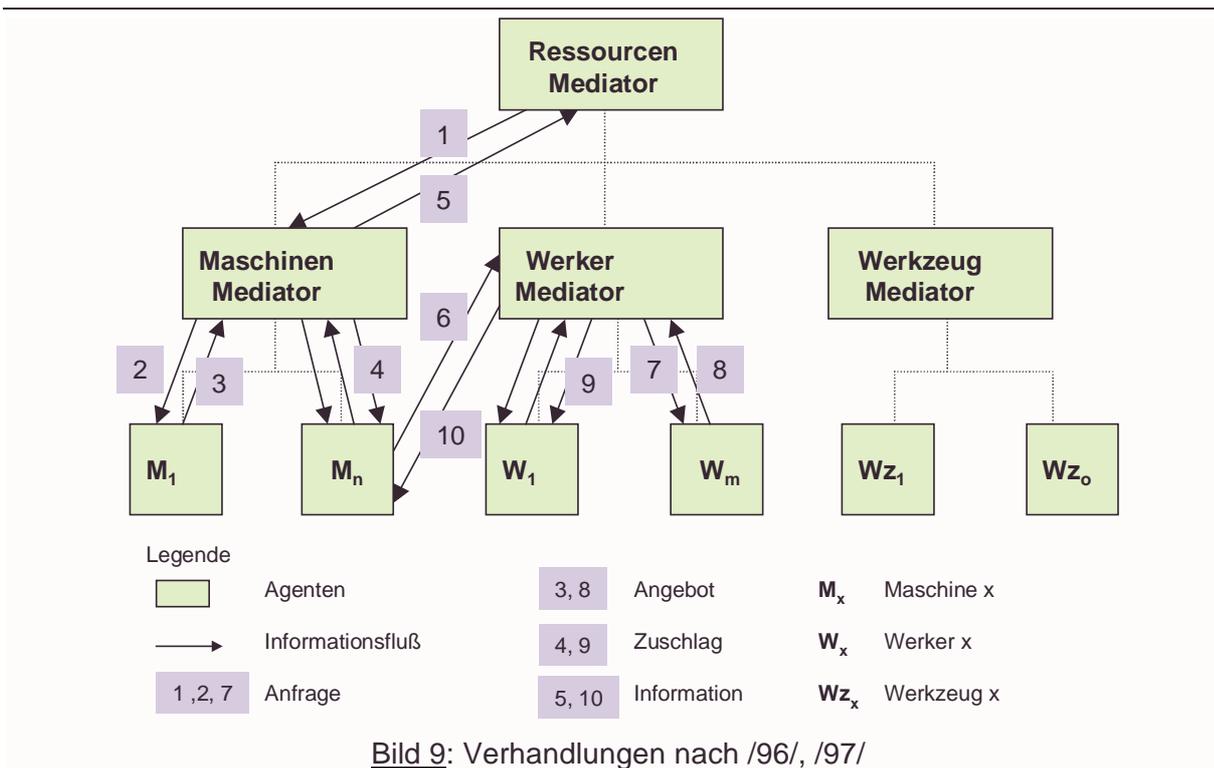


Bild 8: Agenten für die Transportdomäne nach /32/

Ein sogenannter Brokeragent übernimmt die Aufgabe, Aufträge den Agenten anzubieten. Den Zuschlag erhält der meistbietende.

Bild 8 zeigt ein System von FISCHER /32/. Bei diesen Systemen bleibt eine gewisse Hierarchie bestehen. Für jeden LKW und jede Spedition wurde ein Agent eingeführt. Gesamtaufträge werden von dem Makleragenten ausgeschrieben und an die Speditionen weitergegeben (1), die ihrerseits Teilaufträge an die Lkws weiterleiten (2). Die Lkw-Agenten können jetzt ein Angebot basierend auf der aktuellen Auslastung berechnen, dabei muß ein Angebot nicht den gesamten Teilauftrag umfassen. Es kann also wiederum nur für einen Teil ausgelegt sein. Angebote werden an die übergeordnete Instanz weitergegeben (3) und (4). Der Speditionsagent führt die Teilangebote zusammen und gibt ein Gesamtangebot an den Makler weiter. Können die Teilangebote den Gesamtauftrag nicht abdecken, werden Restaufträge an die Lkw-Agenten geschickt mit einem erneuten Aufruf zu Angeboten. Ein System aus 400 Aufträgen für 3 Speditionen a 20 LKW kann in ca. 30 min verplant werden. Dabei wird eine Auslastung von über 50% erzielt, was den Durchschnittswerten der Lkws auf den Straßen Deutschlands entspricht.



Das System in /96/ und /97/ zeigt Ähnlichkeiten zu dem System von FISCHER in der hierarchischen Aufteilung (Bild 9). Mediatoren sind verantwortlich für bestimmte Maschinen-, Werker- und Werkzeuggruppen. Die Mediatoren verständigen sich mit den Maschinen, Workern und Werkzeugagenten über Sprechakte: Anfrage, Angebot, Bekanntgabe, Informieren und Zuschlag. Nach einer Anfrage (1) und (2) kalkulieren alle Maschinenagenten die Prozeßzeiten und Kosten. Dafür können sie je nach Bedarf über den Werker-Mediator Anfragen an die Agenten W_1 bis W_m selbständig stellen, um ihr Angebot zu vervollständigen. Das Angebot schicken sie dann an den Maschinen-Mediator zurück. Die Maschine mit dem besten Angebot erhält den Zuschlag.

Grundsätzlich lassen sich zwei Arten der Verhandlung erkennen. Einerseits, wie hier beschrieben, werden Maschinen- oder Ressourcenagenten aufgefordert, ein Angebot zu kalkulieren. Andererseits können aber auch Auftragsagenten aufgefordert werden. Ressourcenagenten fordern Aufträge und Auftragsagenten schicken Angebote zurück. Ansätze hierzu sind in /60/, /25/, /74/ beschrieben.

Der autonome Ansatz unterscheidet sich in der Hinsicht von den beschriebenen Ansätzen, daß es keine Hierarchie gibt. Agenten in diesem Ansatz werden nicht von anderen Agenten gesteuert. Sie haben die Möglichkeit mit jedem Agent der Gesellschaft zu kommunizieren und Informationen auszutauschen. Diese Art Agentengesellschaft ist nach /95/ für verteilte Entwicklungsumgebungen geeignet, in der es viele Interaktionen zwischen den beteiligten Instanzen gibt. In der Produktionsplanung und -steuerung sind hingegen eine Vielzahl von verschiedenen Ressourcen zu steuern. Das würde voraussetzen, daß jeder Agent über jeden anderen informiert ist. So wurde die Aufgabe, Wissen über die Umgebung anzusam-

meln den Agenten genommen und einem Broker-Agenten in die Hand gegeben. Dieser Broker hat die Aufgabe, Auftrags-, Ressourcenagenten und umgekehrt zu vermitteln.

2.2.3 Anwendung in der Materialversorgung

Zentrale Verfahren der Steuerung lösen die Zielkonflikte über Steuerungsbefehle auf, die von übergeordneten Steuerungssystemen an die untergeordneten gehen. Die Komplexität der Steuerungsaufgabe wird durch eine hierarchische Aufteilung der Steuerungssysteme bewältigt. Allerdings stellt sich vor dem Hintergrund entstehender Produktionsverbände die Frage, ob eine zentrale Steuerung im Verbund wünschenswert ist.

WIENDAHL, LUCZAK, KUHN und DANGELMEIER teilen Verbände in die Kategorien Strategisches Netzwerk, Virtuelles Unternehmen, Operatives Netzwerk und Regionales Netzwerk, in dem sie die Funktionsweise in den Vordergrund stellen, um so ein breites Feld beobachtbarer Kooperationen zu beschreiben /17/.

Unter einem *strategischen Netzwerk* wird ein Unternehmensverbund verstanden, der von einer Unternehmung strategisch geführt wird. Die strategische Führung äußert sich darin, daß das führende Unternehmen auf dem Markt agiert. Unter den Bedingungen eines Käufermarktes ist diese Unternehmung meist ein Endprodukthersteller oder eine Handelsunternehmung, der die Art und Strategie wie der Markt bearbeitet wird, sowie Form und Inhalt der interorganisationalen Beziehung bestimmt. In bezug auf die Selbständigkeit einer Unternehmung im Netz stellt SYDOW fest, daß sie in wirtschaftlicher Hinsicht tendenziell eingeschränkt ist, da hier eine Abhängigkeit zu anderen Unternehmen vorhanden ist, doch formell bleibt sie gewahrt /105/. Strategische Netzwerke sind relativ stabil. Die angewandte Steuerung entspricht der Fremdbezugssteuerung mit Mengen- und Terminvorgaben. Sind die Voraussetzungen für eine zyklische Planvorgabe mit geringer Variantenzahl in den Produkten gegeben, ist auch eine Kanbansteuerung zu finden.

Das *virtuelle Unternehmen* ist ein temporärer Verbund aus unabhängigen Unternehmen, Zulieferanten und Kunden, die durch Informationstechnologie verknüpft sind, um Fähigkeiten, Kosten und Marktzugriff zu teilen /13/, /20/, /65/. Eine Grundvoraussetzung ist ein unternehmensübergreifendes Informationssystem. Nur durch das schnelle Übermitteln von Informationen, wie Spezifikationen, Aufträgen oder Steuerungsbefehlen, kann ein so dynamisches Gebilde existieren. Nach außen ist die arbeitsteilige Leistungserbringung nicht sichtbar. Ein Unternehmen bleibt nur solange in einem Verbund, wie der Verbund nützlich ist, danach wird der Verbund gewechselt.

Im *Operativen Netzwerk* besteht die Kooperation darin, daß freie Ressourcen von den Partnern gemeinsam genutzt werden. Partner können kurzfristig auf Leistungen anderer zu-

rückgreifen. Hierzu gehören insbesondere Produktions- und Logistikprozesse. Die gemeinsame Nutzung von Ressourcen wird auch „Ressourcenteilung“ genannt /117/. Das Kriterium für *Regionale Netzwerke* ist die räumliche Nähe der Partner. Beispielsweise suchen in der Automobilindustrie, obwohl strategisch geführt, die Partner die räumliche Nähe. Die einzelnen Kategorien müssen nicht alleine auftreten.

Zu beobachten ist, daß eine engere Bindung im Verbund mit höheren Anforderungen an die Vorgaben bezüglich der Genauigkeit und der Kurzfristigkeit der Bestelltermine erfolgt (Bild 4 auf Seite 10). Das setzt voraus, daß auf der operativen Ebene Abstimmungen kurzfristig zwischen den Partnern erfolgen. Hierfür bieten Agentengesellschaften einen geeigneten Rahmen. Diese Anbindung ist in den zentralen Steuerungssystemen wenig berücksichtigt, welches auf den ursprünglichen Einsatz dieser Verfahren für eine innerbetriebliche Steuerung zurückzuführen ist.

Ziel der Transportsteuerung ist es, eine Zuordnung der Transportaufträge zu Lkws zu finden, Verspätungen klein und die Transportkosten niedrig zu halten. Allerdings wird auch hier häufig aufgrund der Komplexität des Problems und des geringen zeitlichen Planungshorizonts auf Heuristiken zurückgegriffen /63/. Drei Hauptkriterien sind dabei zu beachten /33/:

- Ladezeiten: Die zu einer Ladung gehörenden Module oder Komponenten müssen zeitlich aufeinander abgestimmt werden.
- Be- und Entladeorte: Es gilt eine möglichst günstige Route zwischen den einzelnen Orten zu finden.
- Güter: Bestimmte Güter benötigen bestimmte Transportmittel oder dürfen nicht umgeladen werden.

2.3 Simulation

2.3.1 Einordnung in die Steuerung

Bei einer Vielzahl an Möglichkeiten, kurzfristig in den Materialversorgungsprozeß einzugreifen, und bei ständig wechselnde Rahmenbedingungen zeigt meist nur die Erfahrung, welche Auslegung oder Ablaufstrategien zum Erfolg führen /119/. Planungs- als auch betriebsbegleitende Simulation zeigt Auswirkungen von Planungen auf und ist ein geeignetes Werkzeug, um Planungsergebnisse abzusichern /111/.

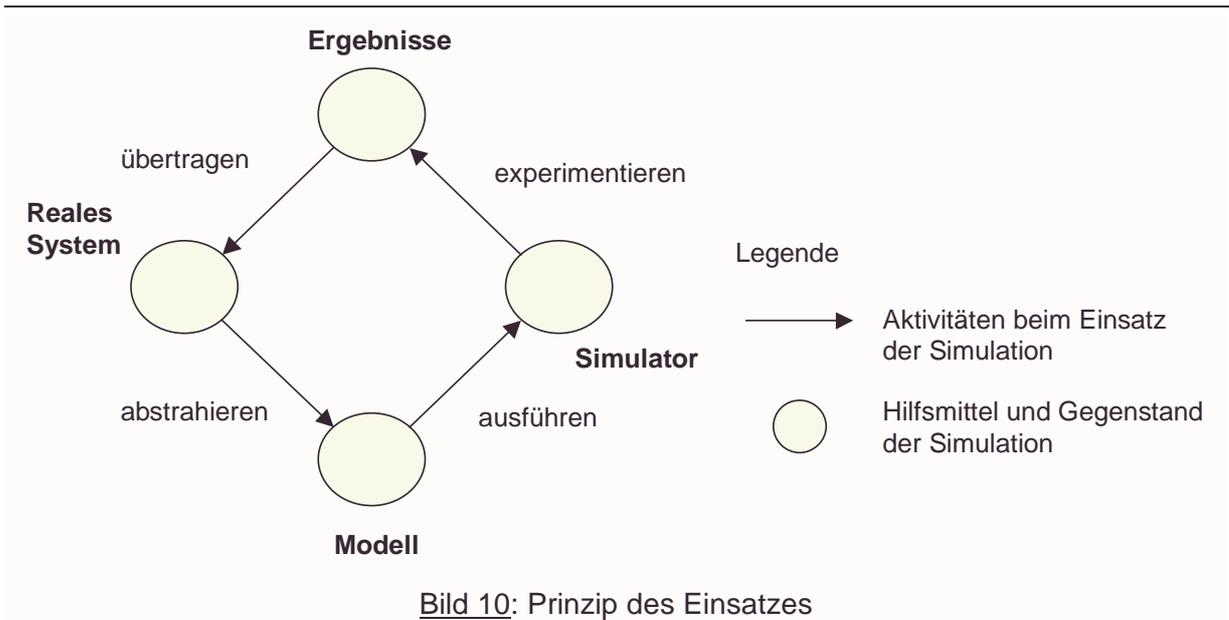


Bild 10: Prinzip des Einsatzes

Nach LAW /59/ ist Simulation der Prozeß der Modellbeschreibung eines realen, d.h. bereits realisierten oder in der Zukunft zu realisierenden, dynamischen Systems und anschließendes Experimentieren mit diesem Modell mit der Absicht, entweder das Systemverhalten zu verstehen oder verschiedene Strategien für Systemoperationen zu entwickeln. Der Begriff Simulation leitet sich von dem lateinischen Wort „simulare“ ab und bedeutet das Nachbilden oder Nachahmen von Vorgängen. In der VDI 3633 /110/ wird Simulation als „das Nachbilden eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierfähigen Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind“ definiert. In der Simulation ändern sich Zustände im Zeitverlauf. Das prinzipielle Vorgehen bei der Simulation wird in Bild 10 verdeutlicht.

Kennzeichnend für die Simulation ist, daß ein bereits existierendes oder geplantes System in ein Modell überführt wird. Dieses Modell ist in einem Simulationssystem (Simulator) ausführbar. Dadurch können die Vorgänge im Modell nachvollzogen und analysiert werden. Experimente im Simulator helfen, Kenngrößen zu ermitteln, um verschiedene Einstellungen und Vorgänge zu vergleichen und zu bewerten. Anhand dieser Kenngrößen können Schlußfolgerungen gezogen werden, die durch Modifikation des Modells bestätigt und in das wirkliche System übertragen werden können.

FELDMANN und REINHART unterscheiden drei Detaillierungsebenen der Simulation /81/. Der technologische Prozeß ist auf der Komponentenebene von Bedeutung. Beispiele sind Stabilitätsprüfungen. Auf der Stationsebene stehen Kollisionsbetrachtungen im Vordergrund, eine bessere Wegführung zu erarbeiten. Auf der Systemebene werden die kapazitäts-, zeit- und mengenbezogenen Eigenschaften betrachtet. Für Betriebsmittel beispielsweise läßt sich der Kapazitätsbestand über einen bestimmten Zeitraum ermitteln. Dementspre-

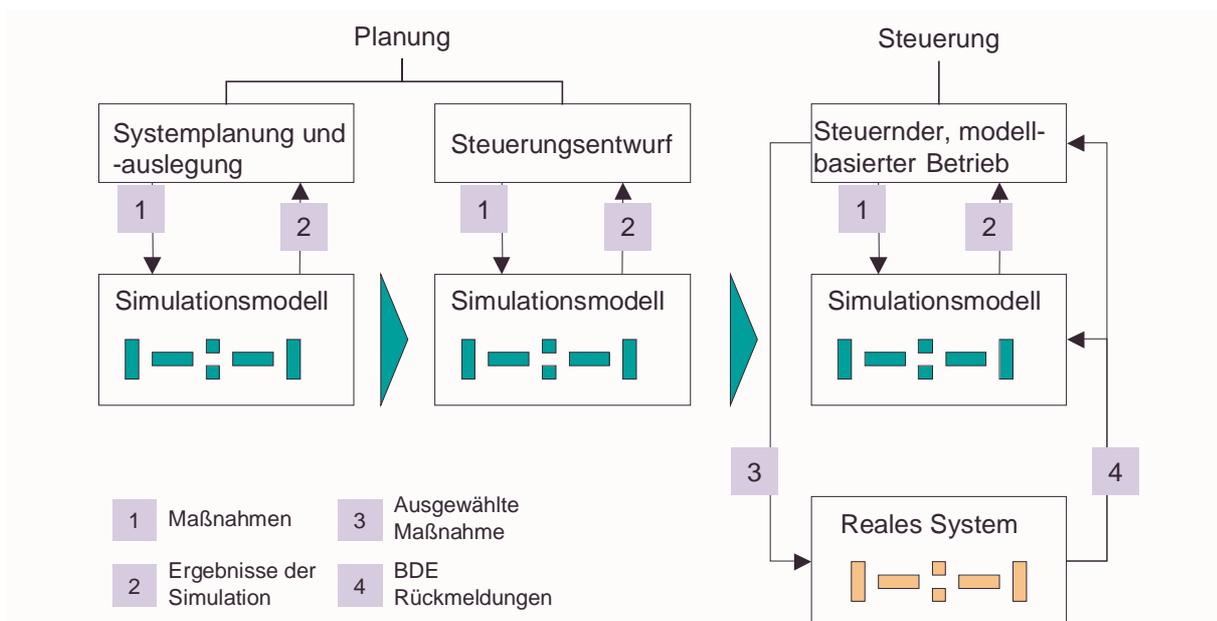


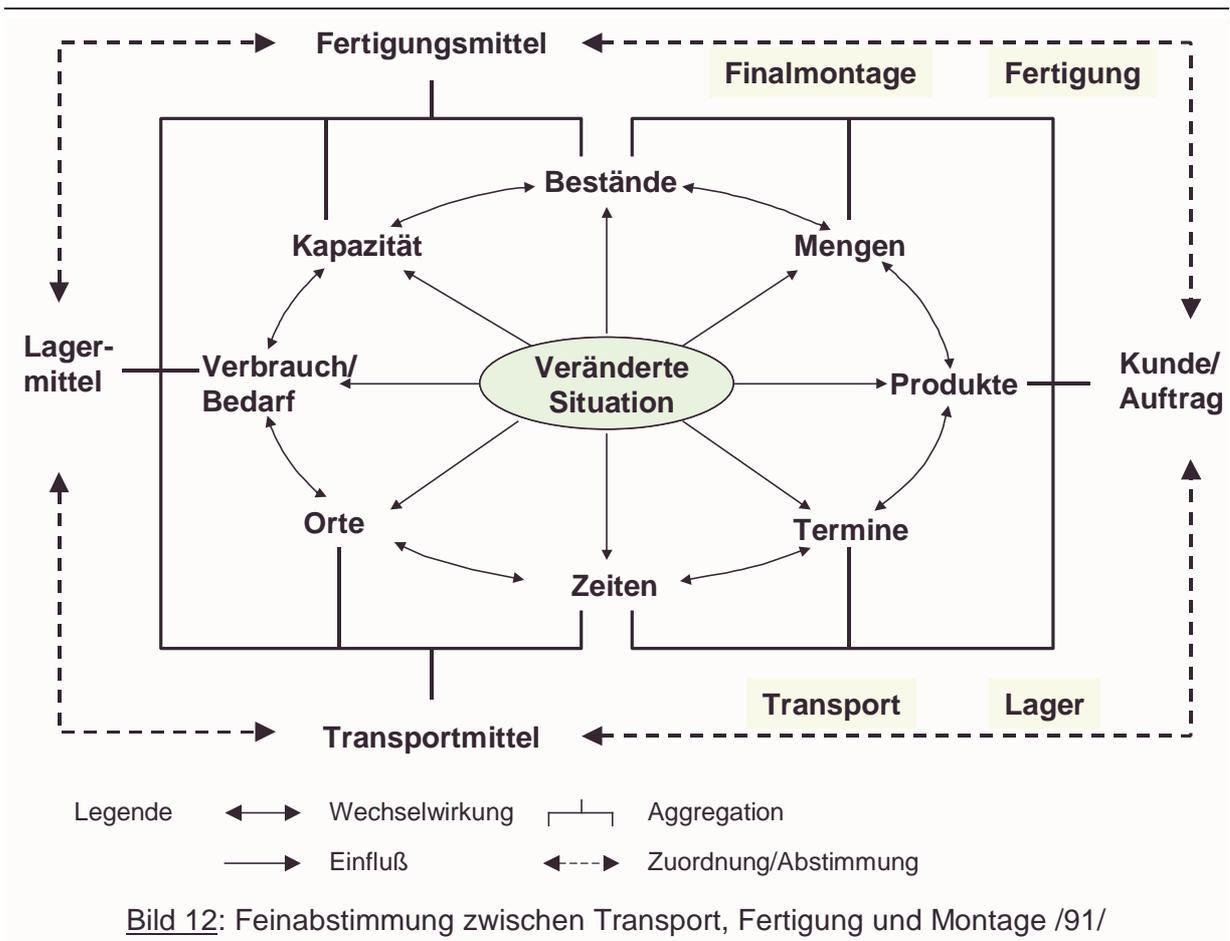
Bild 11: Einsatz des Simulationsmodells für Planung und Steuerung nach /64/

chend liegt die Zielsetzung darin, Strukturen, Betriebsmittel und Steuerungsregeln zu verändern und zu bewerten. Simulation auf Systemebene ist Gegenstand dieser Arbeit.

Bild 11 zeigt die Phasen einer Simulationsstudie und die Nutzung der Simulationsmodelle für die Aufgaben der Planung und Steuerung. Die Hauptziele in den frühen Phasen der Planung sind der Funktionsnachweis, -auslegung und -optimierung /30/. MILBERG et Al. /64/ und WIENDAHL /114/ gehen mit dem Einsatz der Simulation soweit, daß sie Simulation als Unterstützungswerkzeug für die Steuerung einsetzen. Die simulationsgestützte Steuerung wird ergänzend zur Produktionsplanung und -steuerungssystem (PPS) durchgeführt. Die Simulation wird in diesem Ansatz als Frühwarninstrument durch Schätzung schwer meßbarer Zustandsinformationen und Hilfsmittel zur Auswahl und Optimierung von regelnden Maßnahmen eingesetzt /3/. Rückmeldungen über Aufträge aus dem Produktionsprozeß werden in einem Leitstand mit den Zielvorgaben verglichen. Auf Abweichungen wird mit veränderten Maschinenbelegungsplänen reagiert, die mit Hilfe der Simulation bewertet werden. Die so ermittelte beste Lösung wird umgesetzt.

2.3.2 Nutzen im Materialversorgungsprozeß

Ein dynamischer Materialversorgungsprozeß ist in der Lage, sich veränderten Situationen durch geeignete Steuerung zielgerichtet anzupassen. Wie in Bild 12 dargestellt, erfordert es eine ständige Beobachtung relevanter Größen wie Bestände, Mengen, Termine, Zeiten, Verbrauch bzw. Bedarf oder Kapazitäten, um daraus eine neue Zuteilung von Aufträgen und Ressourcen bzw. eine neue Abstimmung der Ressourcen untereinander durchzuführen. Eine solche neue Aufteilung kann beispielsweise durch Veränderung der Steuerungs-



regeln erzielt werden, wie z. B. „von fünf eingeschleusten Karosserien darf nur eine ein Schiebedach haben“. Diese Steuerungsregel limitiert Mengen spezifischer Produktarten, die zu längeren Ausführungszeiten am Montageband in der Finalmontage für Automobile führen und damit eine relevante Auswirkung auf die entscheidenden Ziele haben kann.

Der Nutzen, der durch Simulation im Materialversorgungsprozeß erzielt werden kann, ist die Bewertung von Auswirkungen verschiedener Steuerungsparameter wie z. B. der oben genannte Steuerungsregeln auf die entscheidenden Ziele. Die Steuerung der Materialversorgung unter Just-in-Time Prinzipien erfordert die exakte Abstimmung einzelner Stufen der Versorgung. Oft wird mit zu großen Sicherheitsbeständen bei allen Partnern geplant. Der Grund liegt darin, daß unter allen Umständen Lieferengpässe vermieden werden sollen. Simulation kann die Situation und die Maßnahmen an Struktur, Betriebsmitteln und Abläufe im Verbund genau bewerten, und damit helfen, eine geeignete Steuerung auszuwählen.

In der internen Materialversorgung konnten CHAN und SMITH eine bessere Abstimmung einer Montagelinie mit den vorgelagerten Bereichen erreichen. Simulation diente zur Bewertung von Maßnahmen /14/. Die Autoren untersuchen die Materialversorgung der Montage eines Automobilherstellers, in der bisher die Komponenten der drei Zulieferbereiche über ein Hochregallager zur Finalmontage geführt werden. So konnte man durch Simulation zei-

gen, daß die entworfenen Maßnahmen sich dazu eignen, das Hochregallager einzusparen und die Komponenten direkt an die Linie zu liefern.

EVERSHEIM et al. entwarfen Regeln zur Steuerung einzelner Bereiche in der internen Materialversorgung, die sie anhand des dynamischen Betriebsverhaltens ableiteten /28/. Ausgangspunkt der Betrachtung ist die Materialversorgung der Montage eines Baumaschinenherstellers. Die vorgelagerten Bereiche sind Karosserie-, Ausleger- und Stielmontage. Als Gütekriterium für Steuerungsregeln, wie z. B. „maximal eine Sonderausrüstung pro Tag“, diene der Durchsatz pro Tag.

Die Beispiele zeigen den Nutzen der Simulation für die Varianten 7 und 8 der Materialversorgung (siehe Bild 2 auf Seite 9). Dieser Nutzen kann auch auf die anderen Varianten übertragen werden. Bild 13 zeigt exemplarisch einen Ausschnitt eines Produktionsverbundes, der hier durch das Fertigen und Lagern der Komponenten bei den Zulieferanten Su_1 bis Su_n , den Transport der Komponenten zu der Finalmontage As_1 und der Komponenten von Su_1 und Su_2 zu As_m und das dortige Lagern und Montieren der Komponenten definiert ist. Hierzu zählen die Varianten 1 bis 6 nach Bild 2.

Beispielsweise möchte der Zulieferant Su_2 für die Montagelinie As_m eines Automobilherstellers produktionssynchron anliefern. Das bedeutet, daß ohne große Lager einzelne Komponenten genau zur richtigen Zeit an die Linie gebracht werden müssen. Die Versorgung hängt von der Einsteuerung der Karosserien in die Linie und der Dauer der Teilprozesse der Versorgung, wie z. B. der Bereitstellung am Band, dem Transport oder den vorausgehenden Fertigungsprozessen, ab. Der Zulieferant erhält von der Finalmontage Abrufmenge, deren Schwankungen und die Wiederbeschaffungszeit. Unentdeckt bleibt, daß es bei bestimmten Reihenfolgen der Karosserien zu Lieferengpässen kommt, da diese Reihenfolgen in der Fertigung des Zulieferanten zu längeren Durchlaufzeiten führen. Um diesen Engpaß zu beseitigen, können weitere Einlastregeln für die Finalmontage genügen. Versucht der Zulieferant, den Engpaß in der eigenen Fertigung zu beheben, muß er eventuell weitere Betriebsmittel einsetzen, was wesentlich teurer ist als die Änderung der Einlastregeln in der

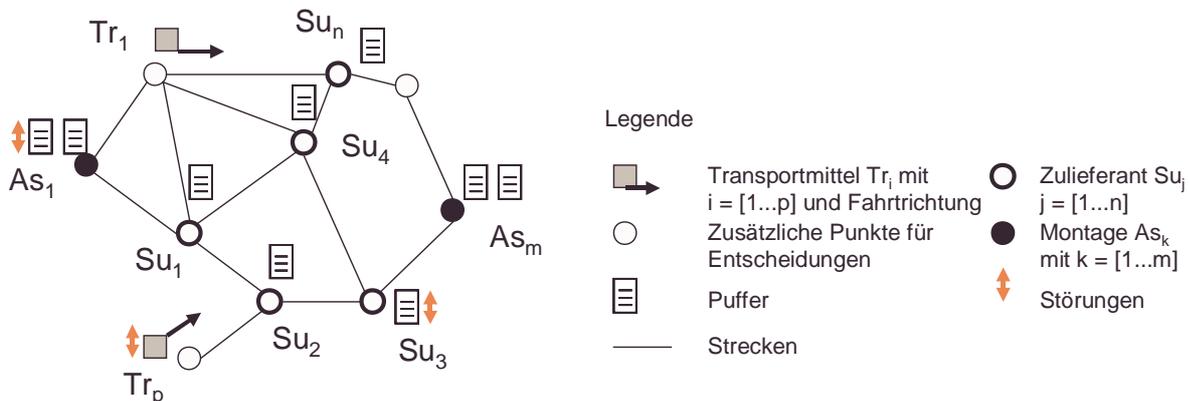


Bild 13: Subsysteme eines Materialversorgungsprozesses

Finalmontage. Simulation hilft Engpässe schon im Modell zu entdecken und kostengünstige Maßnahmen zur Verbesserung zu entwickeln.

Ein weiteres Beispiel ist die Verbesserung des Transports. Der Transportunternehmer hat das Ziel seine Transportmittel Tr_1 bis Tr_p besser auszulasten. Daraus folgt mit weniger Transportmitteln mehr Aufträge auszuführen, ohne dabei die Liefertreue zu vernachlässigen. Hierfür erhält er von der Finalmontage die Zeitfenster der Versorgung und von den Zulieferanten die Abrufmengen und deren Schwankungen. Daraufhin bündelt der Transportunternehmer die Zulieferanten zu einer Transportroute. Diese Route ermöglicht, die Transportmittel besser auszulasten, da kleinere Menge transportiert werden. Gleichzeitig wird die Versorgungsfrequenz erhöht, was in der Finalmontage hilft, mit kleineren Puffern zu arbeiten. Jedoch bleibt unberücksichtigt, daß die Bündelung der Zulieferanten in der Finalmontage zu Engpässen führt, da die Transportmittel mehrere Entladezonen pro Versorgung anfahren. Simulation würde diese Engpässe bereits in der Planung kenntlich machen.

Es wird deutlich, daß die Aufgabe, den Materialversorgungsprozeß zu gestalten, eine ganzheitliche Betrachtung über alle Partner hinweg erfordert, um eine geeignete Steuerung zu finden. Bisher wird die zeitdiskrete Simulation hauptsächlich auf Systemebene an einzelnen Standorten eingesetzt. Es wird der interne Materialversorgungsprozeß mit Modellen von Hochregallager-, Montage- und Fertigungs- sowie Transportsystemen betrachtet. Hierfür wurden in der Vergangenheit eine Vielzahl von Simulationssystemen entwickelt. Jedoch können Modelle, die für das eine Simulationssystem entwickelt wurden, nicht auf einem anderen Simulationssystem ausgeführt werden /99/.

2.3.3 Rahmenbedingungen der Simulation im Verbund

Ein entscheidender Vorteil hinsichtlich der Kosten und des Aufwandes einer Simulation im Verbund kann dadurch entstehen, daß man auf bereits existierende Simulationssysteme und -modelle zurückgreift. Eine verteilte Simulation durch Kopplung der bereits bestehenden Modelle macht es möglich, schnell den Materialversorgungsprozeß im Verbund abzubilden und zu simulieren. Neben der Erstellung des Gesamtmodells müssen die Ziele der Simulation genau festgelegt, Experimente geplant, Maßnahmen im Vorfeld festgelegt und unter den Partnern abgesprochen werden.

Bild 13 zeigt die Möglichkeiten, die diese Kopplung für einen Produktionsverbund bieten. Su_1 bis Su_n haben Hochregallager und bereits simulierte Verpackungs- und Fertigungslinien, die beiden Finalmontagen As_1 und As_m haben ihre Montagelinien abgebildet und das Transportunternehmen ihre Wartungs- und Reparaturdienste. Für die Abbildung des Streckennetzes stehen ebenfalls bereits vorhandene Modelle zur Verfügung /88/. So werden

beispielsweise Verkehrssimulationen durchgeführt, um Aussagen über Baumaßnahmen im Vorfeld zu erhalten.

Daraus resultieren folgende Rahmenbedingungen:

- Es sind viele Simulationswerkzeuge entwickelt worden und auch im Einsatz. Die Verwendung nur eines Simulationswerkzeuges würde den damit verbundenen Schulungs- und Einarbeitungsaufwand der Partner in einem Verbund nicht rechtfertigen.
- Ein Simulationsmodell muß aktuell gehalten werden. Der Verwaltungsaufwand aller Daten in einem sich dynamisch rekonfigurierenden Verbund ist zu hoch. Das erfordert eine offene dynamische Struktur der Subsysteme. Es muß möglich sein, neue Elemente in das System zu integrieren. Das Modell muß den Anforderungen des Verbundes folgen.
- Erfahrungen am Simulationsmodell zu sammeln, setzt die Verständigung der Partner über die zu untersuchenden Modellparameter und die verfolgten Ziele voraus. Erst wenn dies geschehen ist, kann mit der Durchführung der Experimente begonnen werden.
- Ein einziges Simulationsmodell eines Versorgungsprozesses hält alle Daten auf einem Rechner. Da hier Daten aller Partner integriert werden müssen, kann es zu einem ungewollten Know-how-Transfer führen.

Simulationswerkzeuge, die für einen Verbund geeignet sind, müssen über Kommunikationsschnittstellen verfügen, so daß Modelle des gesamten Materialversorgungsprozesses und Experimente schnell umgesetzt werden können.

3 Stand der Technik

3.1 Simulationssysteme

3.1.1 Diskrete Simulationsmodelle

Simulation hat sich in der Produktion bewährt und wird daher aus zwei elementaren Gründen eingesetzt: 1. im Vorfeld als Bewertungswerkzeug für Planungen und Steuerungen sowie 2. zur direkten Unterstützung in der laufenden Produktion. Zahlreiche Simulationssysteme sind dafür bisher entwickelt worden. Einige von ihnen, wie z.B. AUTOMOD /5/, /70/, DOSIMIS-3 /55/, FEMOS /122/, GISA /29/, GRAFSIM /68/, KYPOS /75/, MOSYS /103/, NET /80/, PLATO-SIM /64/, PROMODEL /79/, SIMPLE /18/, SIMULAST /43/ und SLX /44/ sind schon seit mehreren Jahren im Einsatz. Unterschiede weisen Simulationssysteme in der Abbildung produktionsrelevanter Merkmale auf. Beispielsweise bietet MOSYS Bausteine zur Abbildung des Fügens und Prüfens, während in AUTOMOD diese Bausteine durch Erweiterung anderer erstellt werden müssen. Auf der anderen Seite verfügen Simulationssysteme wie z. B. AUTOMOD über 3D-Darstellungen. Eine gemeinsame Grundlage genannter Simulationssysteme ist das diskrete Simulationsmodell, welches im folgenden bei der Realisierung einer Kommunikationsschnittstelle zwischen Simulationssystemen genutzt werden soll.

Ganz allgemein soll ein Modell durch Abstraktion von den tatsächlich verwendeten Komponenten, wie z. B. Bauteilen, Werkzeugen, Maschinen, Steuerungen und Hilfsmitteln, den Prozeß beschreiben, indem es die Zielgröße als Systemantwort bei allen denkbaren Betriebsbedingungen wiedergibt /100/. Hierbei geht es um das Beschreiben, Aufstellen oder Bestimmen einer Übertragungsfunktion, die eine Menge von Eingangswerten in eine Menge von Ausgangswerten überführt. Drei Merkmale charakterisieren ein Modell /83/:

1. das Abbildungsmerkmal, denn Modelle sind „Abbildungen ihrer natürlichen und künstlichen Originale“,
2. das Verkürzungsmerkmal, denn es werden nur die für einen Betrachtungszweck relevanten Merkmale des Originals erfaßt,
3. das pragmatische Merkmal, denn „Modelle erfüllen ihre Ersetzungsfunktion nur (a) für bestimmte Subjekte, (b) innerhalb bestimmter Zeitintervalle und (c) unter Einschränkung auf bestimmte gedankliche und tatsächliche Operationen“.

Diskrete Simulationsmodelle reduzieren Abläufe in der Realität dadurch, daß nur Anfangs- und Endzeitpunkte von Vorgängen für die Systemantwort relevant sind, alle übrigen Zeitpunkte und somit Zwischenzustände werden nicht betrachtet. Bild 14 zeigt einen Ausschnitt der Materialversorgung der Montage, welches als Beispiel dienen soll, verschiedene Ele-

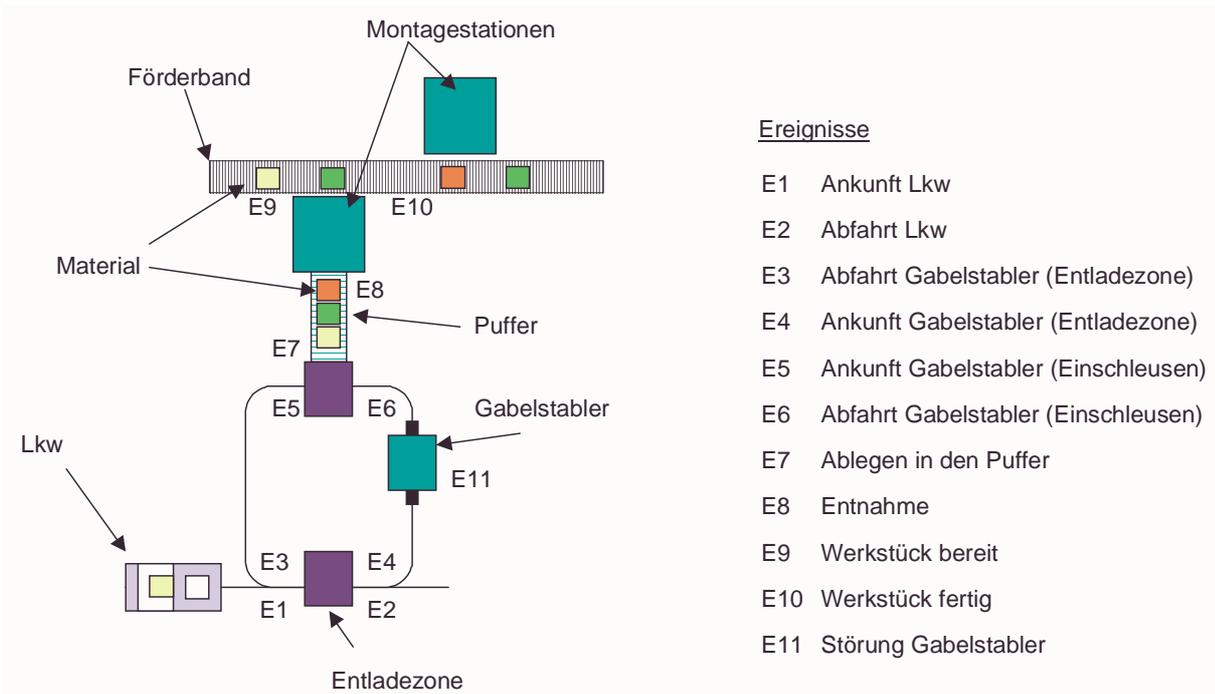


Bild 14: Beispiel einer direkten Versorgung an das Montageband

mente der Simulationssysteme zu erklären. Komponenten werden durch Lkws zu den Entladezonen gebracht und von der Entladezone durch Gabelstapler direkt an das Montageband geliefert. Eine Umsetzung dieses Ausschnittes in ein diskretes Simulationsmodell würde erfordern, Anfangs- und Endzeitpunkte der relevanten Vorgänge, wie Entladen des Lkw oder Transport der Komponenten, auszuwählen. Diese Zeitpunkte sind Ereignisse. Im Bild 14 sind einige dieser Ereignisse exemplarisch dargestellt. Ein Ereignis kann der Ausfall des Gabelstaplers (E11) oder die Ankunft eines Lkws (E1) sein.

Traditionell sind Simulationssysteme für logistische Aufgaben ereignisgesteuert. Darunter versteht man, daß alle relevanten Anfangs- und Endzeitpunkte als Ereignisse in zeitlicher Reihenfolge in eine globale Ereignisliste eingetragen werden. Bild 15 zeigt eine mögliche Reihenfolge der Ereignisse auf einer Zeitachse. Während der Simulation werden die Ereignisse nacheinander abgearbeitet. Jedes Ereignis wirkt auf Zielgrößen. Wird beispielsweise das Ereignis E7 abgearbeitet, verändert sich die Zielgröße „Bestand des Puffers“.

Kern eines Simulationssystems ist deshalb eine „Ereignisschleife“. Solange die Simulation noch nicht beendet ist, wird ein Ereignis aus der Ereignisliste geholt und dann wird dieses Ereignis verarbeitet, wobei die Zielgrößen berechnet werden.

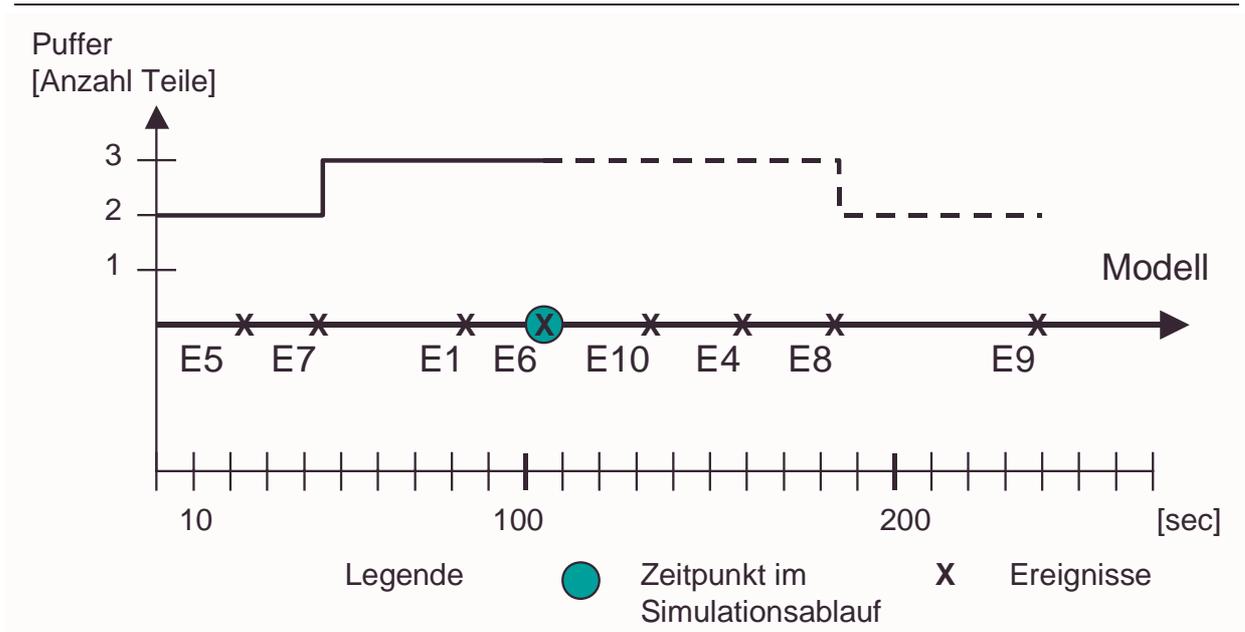


Bild 15: Bestand im Puffer in Abhängigkeit der Ereignisse

3.1.2 Kopplungsrelevante Eigenschaften

Leider sind die entwickelten Systeme nicht alle gleichermaßen für die verteilte Simulation der Materialversorgung geeignet. Entscheidend für die Anwendung sind die kopplungsrelevanten Eigenschaften des Simulationssystems. Dazu gehören:

- die Möglichkeit in die Ereignisschleife einzugreifen und
- eine Schnittstelle zu Programmierumgebungen.

Wenn eine Kopplung der Simulationssysteme durchgeführt werden soll, ist eine Schnittstelle zu einer Programmierumgebung eine notwendige Bedingung. Über diese Schnittstelle erfolgt die Steuerung der verteilten Simulation, sowie der Austausch der Ereignisse. Alle Simulationssysteme besitzen diese Schnittstelle in der einen oder anderen Form. Beispielsweise hat das Simulationssystem AUTOMOD eine Schnittstelle zur Programmierumgebung C.

Simulationssysteme in einer verteilten Simulation müssen ihr Fortschreiten in der logischen Simulationszeit koordinieren, sofern sie nicht unabhängig sind. Dabei gilt es externe Ereignisse in die interne Ereignisliste so zu integrieren, daß alle Ereignisse in der richtigen zeitlichen Abfolge durchgeführt werden /37/.

Bild 16 zeigt die Aufteilung des Beispiels aus Bild 14 auf zwei Simulationssysteme, wobei das eine Simulationssystem weiterhin das Simulationsmodell der Montage enthält, während das andere System die Versorgung simuliert. Deutlich wird, daß durch die Aufteilung das Ereignis E7 für das Simulationsmodell der Montage zu einem externen Ereignis wird. Dar-

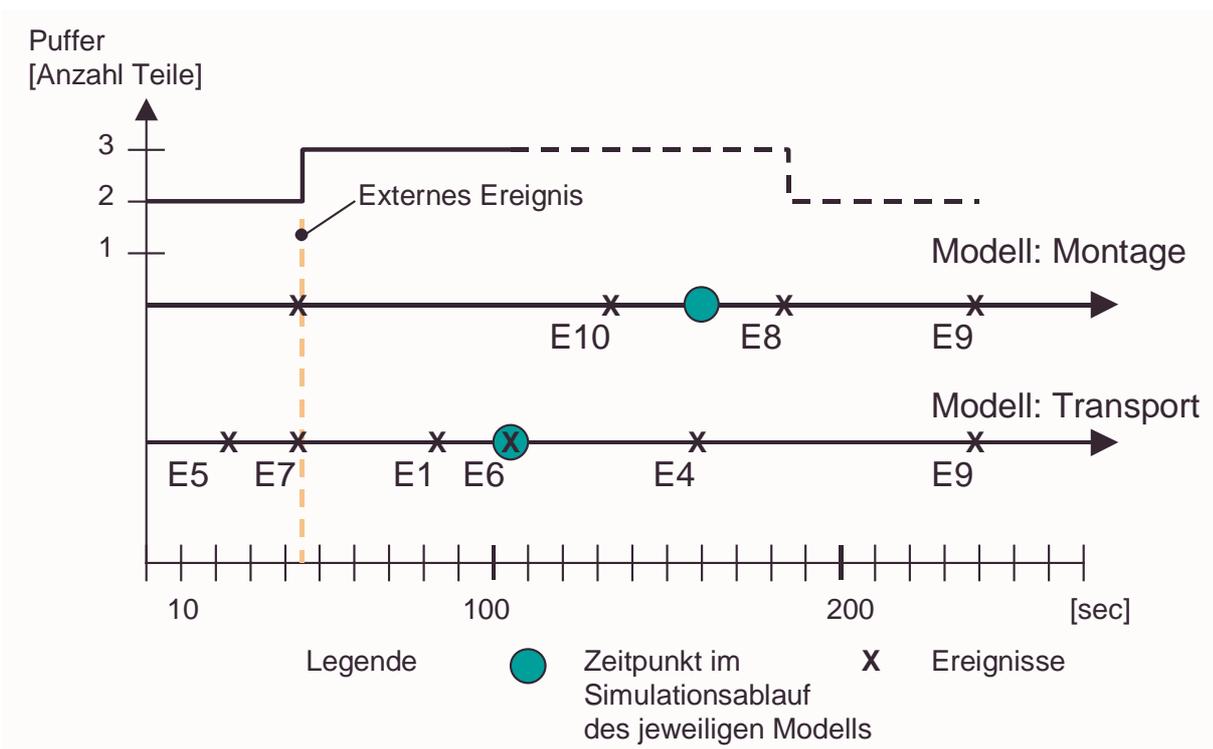


Bild 16: Externe Ereignisse

aus folgt, daß dieses Ereignis in die lokale Ereignisliste des Simulationssystems eingefügt werden muß, damit Zielgrößen, wie z. B. der „Bestand“, richtig berechnet werden können.

In einer verteilten Simulation müssen die externen Ereignisse zwischen den Simulationssystemen ausgetauscht werden, wobei der Zustand eines Simulationssystems entsprechend dem Ereignis verändert wird. Es gilt also externe Ereignisse mit den internen innerhalb eines Simulationssystems so zu integrieren, daß die zeitliche Reihenfolge erhalten bleibt.

Für diese Aufgabe gibt es zwei grundlegende Kopplungsarten. Zum einen werden bei sogenannten konservativen Kopplungen die einzelnen Simulationssysteme so gesteuert, daß ein Konfliktfall nicht eintritt. Diese Art der Kopplung unterliegt einem zentralen Zeitregime. Zum anderen sehen optimistische Protokolle vor, daß jedes Simulationssystem unabhängig in der logischen Simulationszeit fortschreiten kann /38/, /39/, /61/. Erst im Konfliktfall werden Rollback-Mechanismen zur Lösung des Konflikts ausgelöst. Da jedes Simulationssystem selbst für die richtige Reihenfolge der Ereignisse verantwortlich ist, soll diese Kopplungsart als Kupplung mit dezentralem Zeitregime bezeichnet werden. In der konservativen Kopplung liegt der Schwerpunkt also auf der Steuerung der Simulationssysteme, während bei optimistischen Kopplungen geschickte Algorithmen zur Wiederherstellung eines abgespeicherten Simulationszustands im Vordergrund stehen. Bild 17 zeigt eine Übersicht der Kopplungsarten zur verteilten Simulation.

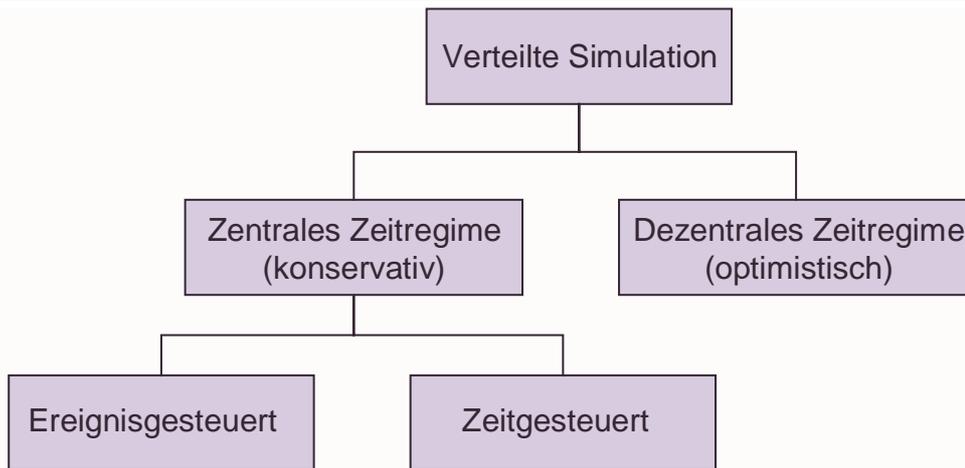


Bild 17: Kopplungsarten der verteilten Simulation

Zentrales Zeitregime

Bei der konservativen Kopplung geht man von einer zentralen Steuerungseinheit aus, die den Zeitfortschritt der Simulationssysteme überwacht. Eine zentrale Steuerungseinheit kann ein Programm sein, das über Schnittstellen mit den Simulationssystemen verbunden ist. Alle beteiligten Simulationssysteme ordnen sich unter ein Zeitregime. Zu der konservativen Kopplung gehören ein zeitgesteuertes und ein ereignisgesteuertes Vorgehen /39/.

Zunächst soll die Zeitsteuerung kurz vorgestellt werden. Dabei dient wieder das Beispiel aus Bild 14 zur Veranschaulichung. Beide Simulationssysteme beantragen ihren Zeitfortschritt bei einer zentralen Überwachungsinstanz, wobei der Zeitfortschritt von den Simulationssystemen durch konstante Zeitabschnitte T_{fort} festgelegt ist. Nach Ablauf von T_{fort} werden alle Ereignisse, welche die jeweils anderen Simulationssysteme betreffen, bekannt gegeben.

Bild 18 zeigt die Vorgehensweise bei einer Zeitsteuerung und macht gleichzeitig das Problem deutlich. Nachteil in diesem Fall ist, daß keine kausalen Ereignisketten zwischen Simulationssystemen verarbeitet werden können. Beispielsweise könnte das Ereignis E7 an die Bedingung geknüpft sein, daß der Puffer nicht voll ist. Dieses Ereignis müßte als Reaktion an den Transport geschickt werden. Das Simulationssystem hat allerdings schon den Zuschlag bekommen, zum nächsten Zeitpunkt fortzuschreiten, in folge dessen der Gabelstapler bereits wieder den Pufferbereich verlassen hat.

Bei einer ereignisgesteuerten Kopplung beantragen die Simulationssysteme den Zeitfortschritt bis zum nächsten lokalen Ereignis, erhalten jedoch von der Steuerungseinheit nur die Erlaubnis bis dorthin in der Zeit fortzuschreiten, wenn kein externes Ereignis vorliegt. Im Fall eines externen Ereignisses wird der Zuschlag nur bis zu dem Zeitpunkt dieses Ereignisses erteilt (Bild 19). Das Simulationssystem „Montage“ beantragt also den Fortschritt bis zu E10, der Transport den Fortschritt bis E7. Da E7 zu den externen Ereignissen für die

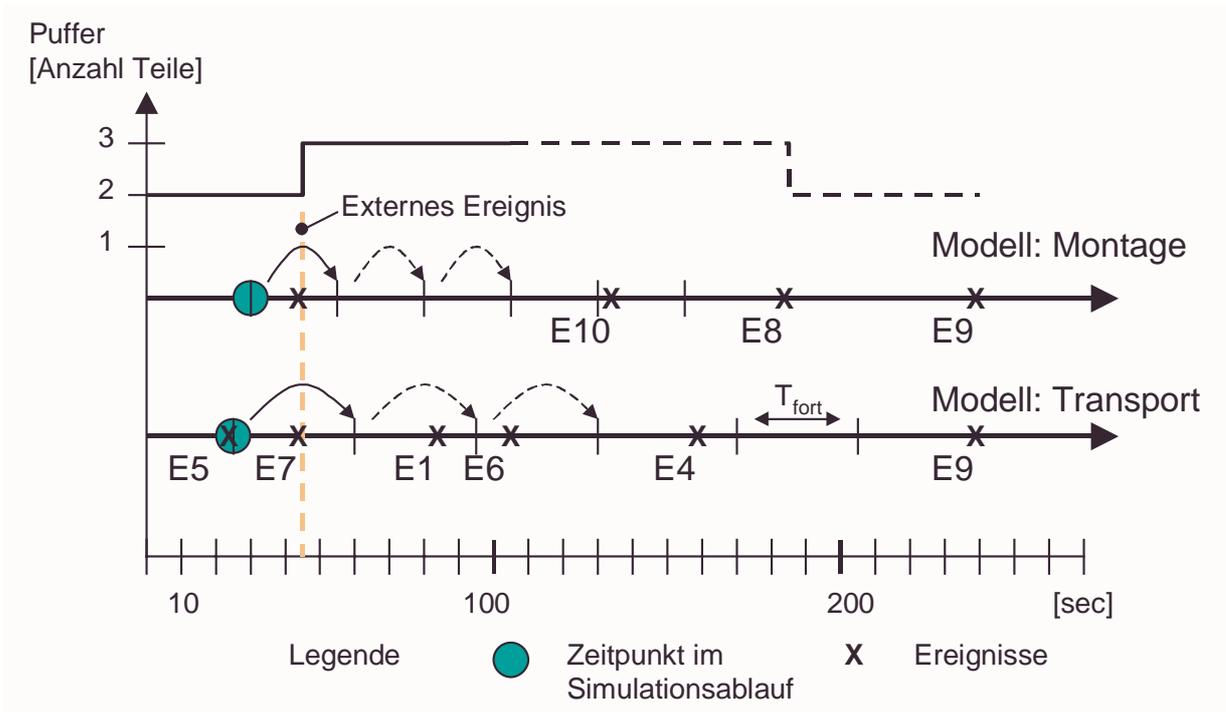


Bild 18: Zeitgesteuerte Vorgehensweise

Montage zählt, erhält die Montage ebenso nur den Zuschlag bis zum Zeitpunkt von E7 in der Zeit fortzuschreiten.

Um verteilte Simulationen mit einer konservativen Steuerung schneller zu machen, wird der *Lookahead* eingeführt. Jedes Simulationssystem in einer verteilten Simulation erhält einen

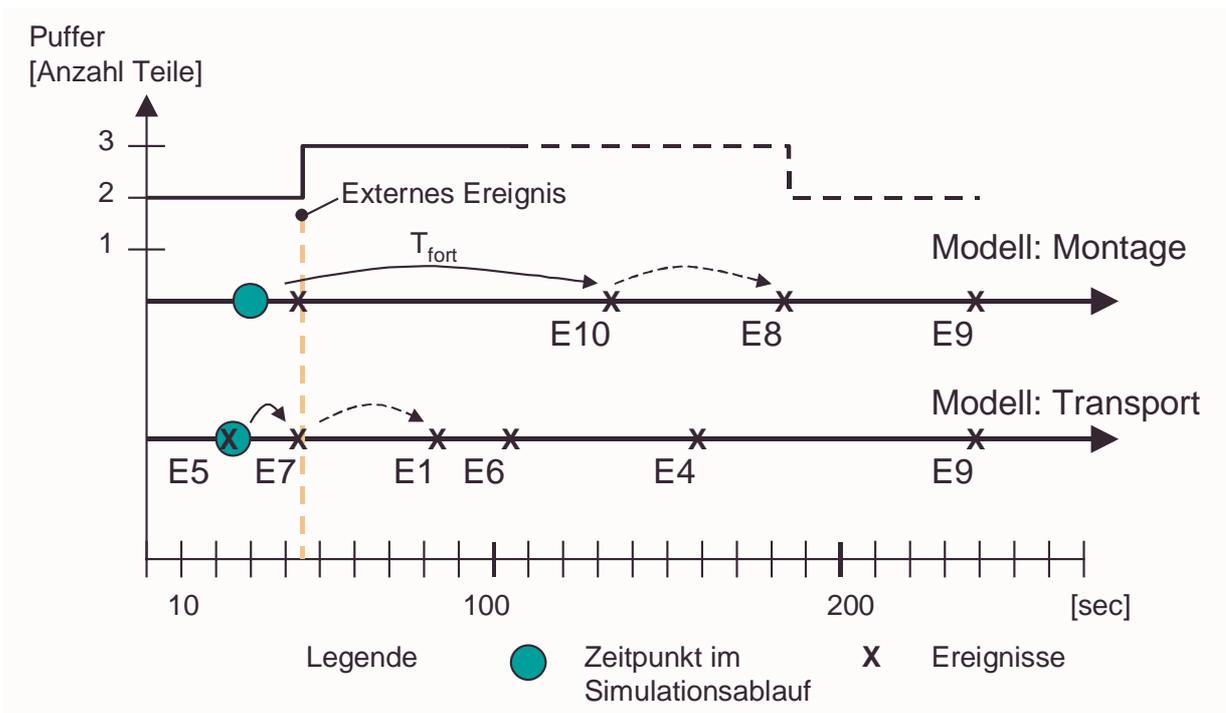


Bild 19: Ereignisgesteuerte Vorgehensweise

Lookahead. Diese Größe gibt einen Zeitraum an, in dem keine externen Ereignisse vom Simulationssystem erzeugt werden dürfen. Mit Hilfe dieser Zusicherung seitens der Simulationssysteme kann die Steuerungseinheit eine untere Zeitschranke berechnen, bis zu der alle Simulationssysteme in ihrer logischen Simulationszeit fortschreiten dürfen. Es muß also nicht unbedingt auf alle Simulationssysteme gewartet werden, um die nächsten Zuschläge zu erteilen. Der Fortschritt der Simulationssysteme in der Zeit bedeutet gleichsam auch einen Fortschritt für die Zeitschranke. Gut gewählte Lookaheads können den Anteil wirklich paralleler Simulation und damit die Performance des Systems erhöhen. Eine gute Wahl des Lookaheads ist allerdings vom Wissen über das zu betrachtende System abhängig /93/.

Die Konservative Steuerung erfordert den Eingriff in die Ereignisschleife, da externe Ereignisse mit internen integriert werden müssen. Das erste Simulationssystem, das diesen Eingriff ermöglichte war SLX. Andere Simulationssysteme wie z. B. AUTOMOD, ließen zum Zeitpunkt der Untersuchung diesen Eingriff nicht zu.

Dezentrales Zeitregime

Optimistische Protokolle erlauben jedem Simulationssystem, unabhängig der externen Ereignisse, in der Zeit voranzuschreiten /19/. Jedes Simulationssystem führt die eingehenden Ereignisse zu den entsprechenden Zeiten aus. Erreicht das Simulationssystem eine Nachricht mit einer niedrigeren Zeitmarke als bereits verarbeitete Ereignisse, dann wird der Fehler dadurch beseitigt, daß diese Ereignisse rückgängig gemacht werden. Dies geschieht gewöhnlich dadurch, daß ein abgespeicherter Zustand wiederhergestellt und die Simulation von diesem Zeitpunkt ab neu gestartet wird.

Bild 20 zeigt ein solches Vorgehen. Es wird deutlich, daß optimistische Protokolle die Fähigkeit des einzelnen Simulationssystems voraussetzen, vorhergehende Zustände wieder herzustellen und bereits an andere Simulationssysteme weitergegebene Ereignisse zu widerrufen /39/. Keines der kommerziellen, zeitdiskreten Simulationssysteme, die bisher für die Produktion entwickelt wurden, besitzt diese Eigenschaft.

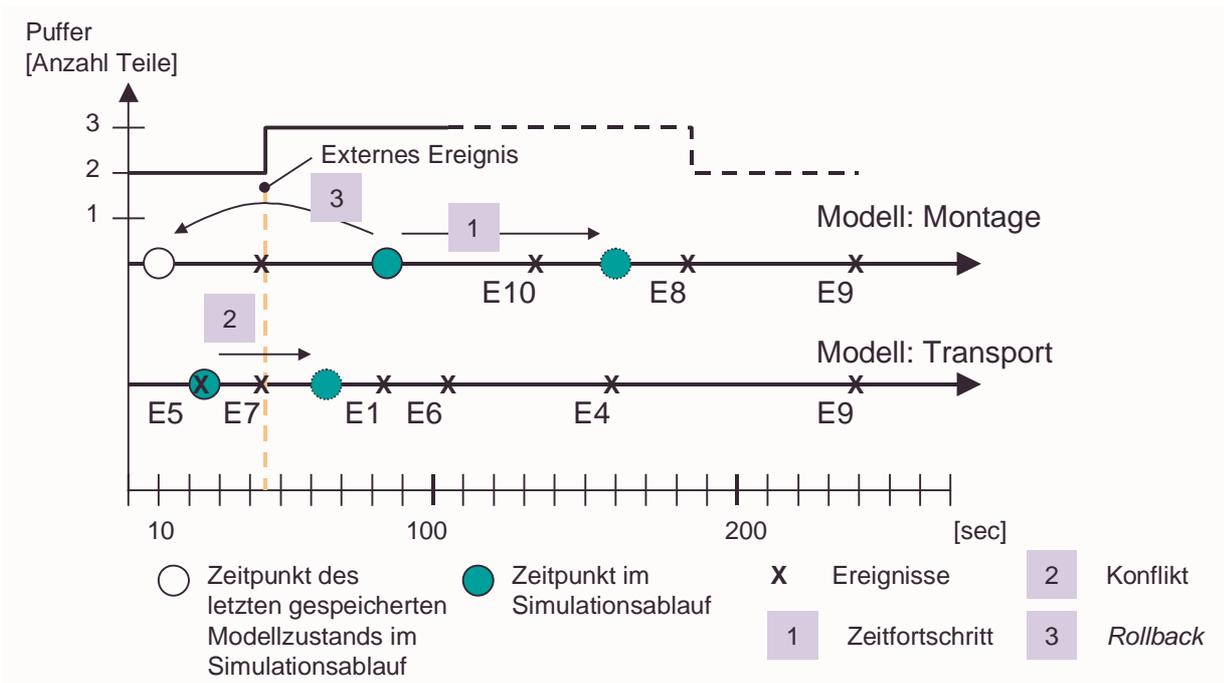


Bild 20: Dezentrale Vorgehensweise

3.1.3 Unterstützung der Anwender

Nicht nur die kopplungsrelevanten Eigenschaften, sondern auch die Unterstützung der Anwender einer verteilten Simulation der Materialversorgung sind von Bedeutung. Simulation beinhaltet, im Gegensatz zu den analytischen Methoden, kein systematisches Vorgehen, das über einen Algorithmus automatisch zu einer optimalen Lösung führt. Nach VDI 3633 /110/ lässt sich die Vorgehensweise bei einer Simulationsstudie in die Phase der Vorbereitung, der Simulationsexperimente und deren Auswertung gliedern, wobei jede Phase in weitere Teilschritte zerlegt wird. Simulationsexperimente werden durchgeführt, um Erkenntnisse über das dynamische Verhalten des simulierten Systems zu gewinnen. Diese Erkenntnisse dienen dann als Entscheidungshilfe zur Verwirklichung der geplanten Ziele am realen System. Die Analyse des dynamischen Verhaltens gehört somit zu den wichtigsten Schritten bei der Simulation. Simulation ist in diesem Sinne also ein „Denkverstärker“, der erst durch Interaktion mit dem Benutzer, d. h. Experimente, Auswertung und Modifikation, eine brauchbare Lösung finden kann.

Deshalb wurden in den letzten Jahren Simulationssysteme um Werkzeuge zum Experimentieren erweitert. Beispiele sind SIMPAD /92/ und ISSOP /54/. Eine Optimierung ist durch iterativen Durchlauf der Schritte Experimente, Auswertung und Modifikation möglich /52/. Die richtige Planung von Simulationsexperimenten ist eine Voraussetzung zur Gewinnung von Erkenntnissen in einer akzeptablen Zeit.

Der Anwender wird dabei wie folgt unterstützt:

- Auswählen der zu untersuchenden Modellparameter

Aus den Zielvorgaben, werden Maßnahmen abgeleitet. Mit diesen Maßnahmen erhofft man sich die festgelegten Ziele zu erreichen. Anhand der Maßnahmen werden die Modellparameter gewählt, welche mit diesen in direktem Zusammenhang stehen. Ist z. B. das Ziel, den Nutzungsgrad einer Montagestation zu erhöhen, könnte eine Maßnahme in der Vergrößerung des Puffers vor der Station sein. Aus dieser Maßnahme könnte der Modellparameter "Pufferkapazität vor Station" abgeleitet werden.

- Bestimmen der einzelnen Simulationsexperimente

Sind die Modellparameter festgelegt worden, muß untersucht werden, ob und in welcher Weise sie das dynamische Verhalten des Systems beeinflussen. Dafür müssen Simulationsexperimente geplant werden, deren Ergebnisse Aufschluß auf die Wirkungsweise der Modellparameter geben.

Um dieses zu erreichen, können verschiedene Techniken eingesetzt werden. Geht es um die Bestimmung der Auswirkung eines Modellparameters, bieten sich einfaktorielle Versuchspläne an. Hierbei wird der zu untersuchende Modellparameter in seiner Ausprägung untersucht, während andere Modellparameter konstant gehalten werden. Für die Untersuchung mehrerer Modellparameter und deren Wechselwirkungen werden mehrfaktorielle Versuchspläne eingesetzt. Im Vordergrund steht hier die Variation der Ausprägungen aller zu untersuchender Faktoren. Zur Ergebnisinterpretation werden beispielsweise in SIMPAD die Varianzanalyse und die Regressionsanalyse eingesetzt und in ISSOP auch genetische Algorithmen.

- Bestimmung der Simulationsdauer für die Simulationsexperimente

Bei der Planung der Simulationsdauer, d.h. die Dauer in der Realität, die durch die Simulation nachvollzogen wird, muß eine Anlaufphase, z. B. Produktionsanlauf in einem leeren Produktionssystem, berücksichtigt sein, um den stationären Betriebszustand sicherzustellen. Diese wird bei den meisten Simulationssystemen durch das Festlegen einer Warmlaufphase realisiert. Während der Warmlaufphase wird auf die Aufnahme der statistischen Kenngrößen verzichtet. Erst nach Beendigung dieser Phase beginnt man mit der Bildung der Statistik.

- Darstellen der Ergebnisse für die Simulationsexperimente

Bei der Analyse und Interpretation der Simulationsergebnisse müssen die Randbedingungen und Vereinfachungen aus der Modellbildungsphase berücksichtigt werden. Die Simulationsergebnisse stellen statistische Größen für ein gegebenes Zeitintervall dar.

Aus diesem Gesichtspunkt müssen diese Daten als eine Stichprobe analysiert und interpretiert werden.

Es gibt sehr viele verschiedene Darstellungsformen für die Simulationsergebnisse, die bei den meisten Simulatoren in tabellarischer oder graphischer Form vorliegen /111/.

- *Liniendiagramme* können für die Veranschaulichung von sich zeitlich ändernden Größen, wie z. B. die Auslastung von Puffern, benutzt werden.
- *Balkendiagramme* stellen zur Darstellung von absoluten und relativen Häufigkeiten, z. B. Störungen, Blockierung usw., eine gute Alternative dar.
- *Kreisdiagramme* werden meistens zur Visualisierung von relativen Gewichtsanteilen, z. B. für Nutzungsgrade, Auslastung usw. verwendet.

3.2 Kommunikationssysteme

3.2.1 Begriffe und Definitionen

Im Verbund sind Interaktionen zwischen den Simulationssystemen notwendig. Dabei geht es um die Verständigung über Ereignis-, Steuerungs- und Experimentierdaten, wofür sich ein Netz miteinander verbundener Rechensysteme anbietet. Der Vorteil liegt auf der Hand, da der elektronische Austausch von Daten den Informationsfluß beschleunigt und fehleranfällige manuelle Dateneingaben reduziert. Der dafür benötigte Dienst einer Simulationssystem-zu-Simulationssystem Übertragung soll von einem Kommunikationssystem erbracht werden.

Kommunikationssysteme verbergen die Details und Komplexität der unterlagerten Netztechnologien /8/. Beispielsweise erhalten Transportunternehmer jeder Zeit die Position der Lkw über Satelliten-Kommunikationssysteme. Diese Systeme sind rund um die Uhr verfügbar und erlauben die bidirektionale Sendung von freiformuliertem Text, vorformulierten Makros und Binärpaketen zwischen Fahrzeug und der Dispositionszentrale der jeweiligen Spedition. Nur die Kommunikationsdienste sind sichtbar für den Anwender, das darunter liegende physikalische Netz nicht. Bild 21 zeigt die Hierarchie vom Rechnernetz über das Kommunikationssystem hin zur Anwendung.

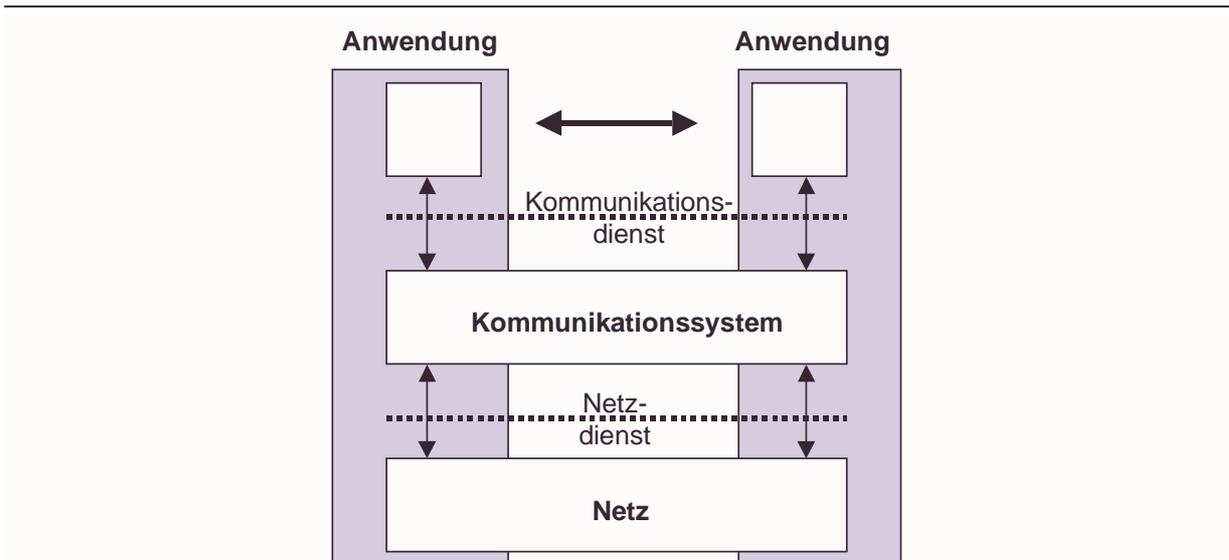


Bild 21: Ein einfaches Modell eines Rechnernetzes /8/

Zur Bereitstellung von diesen Diensten umfaßt ein Kommunikationssystem eine Ansammlung von Protokollen. Ein Protokoll (engl.: *protocol*) enthält Standards für die kontrollierte Übermittlung von Daten. PICOT und WIEGAND unterscheiden hierfür, wie bei der lebenden Sprache, zwischen Syntax, Semantik und Pragmatik. Sprache folgt einer Syntax. Zur Syntax gehört das Zeichensystem selbst, oft als Code bezeichnet, und die Regeln der Verknüpfung der Zeichen und Zeichenketten, d.h. die Grammatik und der Wortschatz. Aus den Worten und Sätzen geht die Bedeutung (Semantik) hervor und löst beim Empfänger eine Reaktion (Pragmatik) aus /77/. Protokolle definieren in Analogie dazu die Sätze und Regeln, nach denen eine Kommunikation zwischen Rechnern abläuft. Datenstrukturen zeigen den syntaktischen Zusammenhang zwischen den einzelnen „Datenwörtern und -sätzen“, die wiederum beim Empfänger eine Reaktion auslösen.

Um einen störungsfreien Datenfluß zu gewährleisten, wurden eine Vielzahl an Protokollen entwickelt. Diese Protokolle lassen sich hierarchisch in einem Schichtenmodell ordnen. Ein international anerkanntes Referenzmodell hierfür ist das nach der *Open Systems Interconnection* (OSI), einer Arbeitsgruppe der *International Organisation for Standardization* (ISO), benannte Schichtenmodell. Das ISO-OSI Schichtenmodell ist in sieben Schichten unterteilt, wobei jeder Schicht Aufgaben zu geordnet sind, die sie der übergeordneten Schicht zur Verfügung stellen. Man unterscheidet zwischen den transportorientierten Schichten (Schichten 1-5) und den anwendungsorientierten Schichten (Schichten 5-7) /104/. Bekannte Protokolle wie z. B. das File Transfer Protocol (FTP) oder Hyper Text Transfer Protocol (HTTP) gehören zur obersten Schicht des Modells. Bild 22 gibt einen Überblick des ISO-OSI Schichtenmodells, dessen Abbildung auf das 3-Komponentenmodell aus /8/ und eine Einordnung der Protokolle für das Internet.

Folgende Schichten umfaßt das Modell im einzelnen:

- Die Übertragungsschicht (*physical layer*, Schicht 1) regelt die Bitübertragung der Daten über ein physikalisches Medium des Netzwerkes.
- Die Sicherungsschicht (*data-link-layer*, Schicht 2) bündelt die Daten zu Paketen und fügt ihnen Informationen hinzu, die zur Weiterleitung benötigt werden. Die 2. Schicht ist für den Transport der Datenpakete von Knoten zu Knoten und für die Fehlerkontrolle zuständig.
- Die Vermittlungsschicht (*network-layer*, Schicht 3) ist für die Kopplung verschiedener Teilnetze zu einem einzigen virtuellen Netz mit einheitlichem Adressenraum zuständig. Das Protokoll, das dieser Schicht meist zugrunde liegt, ist das *internet-protocol* (IP).
- Die Transportschicht (*transport layer*, Schicht 4) erweitert die Kommunikationseigenschaften des Vermittlungsdienstes um Zuverlässigkeit und Sicherheit. Sie überprüft beispielsweise, ob alle Pakete vollständig angekommen sind. Das *transmission control protocol* (TCP) kommt hier zum Einsatz.
- Die Steuerungsschicht (*session layer*, Schicht 5) stellt Funktionen zur Verfügung, um einen Dialog zu steuern und zu synchronisieren.
- Die Darstellungsschicht (*presentation layer*, Schicht 6) ist für die Umwandlung der Daten in das für die jeweilige Anwendung erforderliche Format zuständig. Sie stellt eine ge-

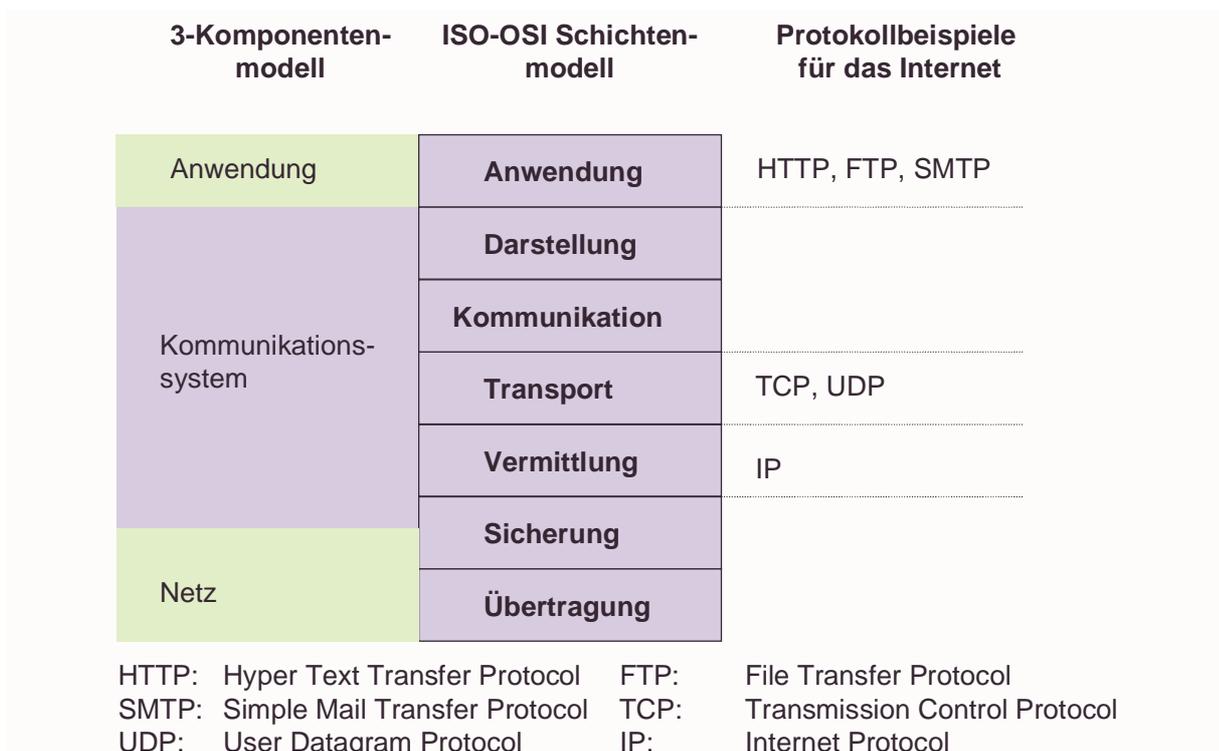
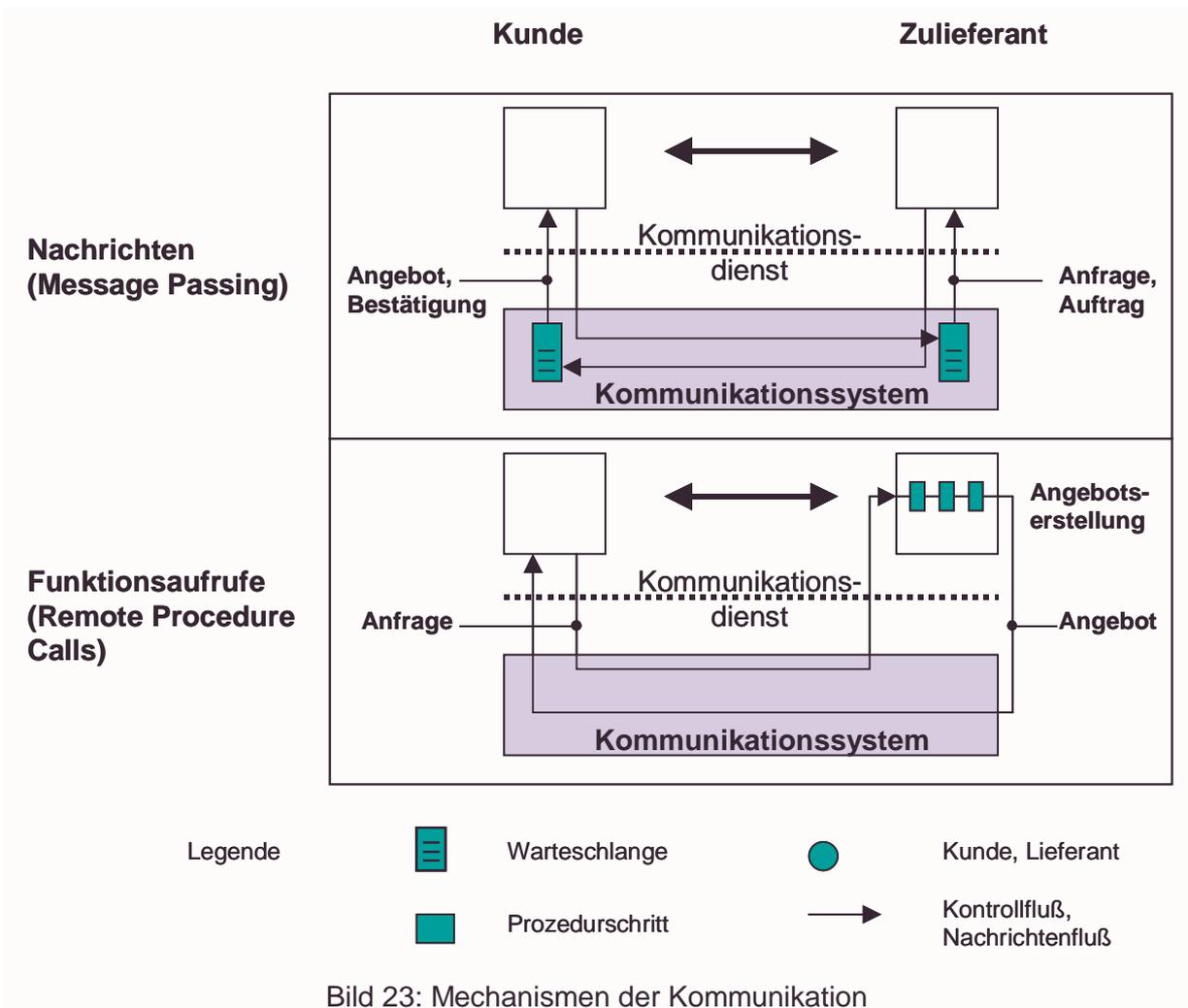


Bild 22: ISO-OSI Schichtenmodell

meinsame Syntax der Daten sicher, die zwischen den Anwendungen ausgetauscht werden.

- Die Anwendungsschicht (*application layer*, Schicht 7) bietet Dienste, die dem Nutzer direkt zur Verfügung stehen, wie beispielsweise Dateiübertragungen oder elektronische Post. Der Nutzer erkennt die Datenübertragung in Form von Anfragen oder Antworten.

Das Kommunikationssystem stellt dem Benutzer auf der letztgenannten Schicht zwei grundlegende Mechanismen zur Kommunikation zur Verfügung. Kommunikation über Nachrichten (*message passing*) bedeutet Angebote, Anfragen und Aufträge in Nachrichten zu verpacken und diese an die Systeme der Zulieferanten zu versenden. Antworten gelangen auf dem gleichen Weg zurück [72]. Ähnlich dem Briefverkehr erhält der Sender keine direkte Antwort. Dies ist der grundlegende Unterschied zur Kommunikation über Funktionsaufrufe (*Remote Procedure Calls*). Hier werden Routinen beim Zulieferanten gestartet, die automatisch ein Angebot liefern, vergleichbar mit der Abfrage über ein Faxgerät. Bild 23 zeigt diese zwei Mechanismen im Vergleich. Kommunikation über Nachrichten wird unterschieden in 1-zu-1 Kommunikation und 1-zu-n Kommunikation (*broadcasting*). Bei der 1-zu-1 Kommunikation gibt es genau einen Sender und einen Empfänger. Die 1-zu-n Kommuni-



kation hingegen sieht mehrere Empfänger vor, ähnlich dem Rundfunk. Eine Variante der 1-zu-n Kommunikation ist das *publish-and-subscribe* Verfahren. Bei dieser Variante sucht sich der Empfänger die Informationen aus, über die er benachrichtigt werden möchte. Der im Englischen verwendete Begriff „*publish-and-subscribe*“ erinnert an das Veröffentlichen und Abbonieren von Zeitschriften. Der Sender spielt hierbei also die Rolle des Verlags und der Empfänger ist der Kunde.

3.2.2 Objektorientierte Systeme

3.2.2.1 Grundlagen

Die Kluft zwischen Anwendung und TCP-IP-Protokollen schießt sich durch die Entwicklung von objektorientierten bzw. agentenbasierten Kommunikationssystemen. Dadurch wird Simulationssystemen der Austausch von Daten über das Internet geöffnet. Objektorientierte Systeme lehnen sich an die Grundlagen der objektorientierten Entwicklung an. Dabei wird davon ausgegangen, daß der Mensch seine Umwelt als eine Menge von Objekten erlebt, die sowohl Eigenschaften als auch ein bestimmtes Verhalten besitzen. Die objektorientierte Entwicklung leitet sich somit direkt aus der menschlichen Denk- und Wahrnehmungsweise her und ist demzufolge leichter zu verstehen als die klassische prozedurale, strukturierte Entwicklung.

Ein Objekt ist eine abgeschlossene Einheit, welche durch bestimmte Eigenschaften und Methoden definiert ist, die diese Einheit ausführen kann. Ein einfaches Beispiel für ein Objekt aus der Materialversorgung ist das Pufferlager. Jedes Pufferlager hat u.a. die Eigenschaften: Anzahl, der darin enthaltenen Elemente, eine Liste aller zur Zeit enthaltenen Elemente, Zeitpunkt der letzten Entnahme und so weiter. Methoden des Objekts sind z. B. Entnahme oder Puffern. Aber nicht nur Personen und Gegenstände können als Objekte betrachtet werden, sondern auch Vorgänge oder Prozesse. So hat beispielsweise das Objekt Puffern die Eigenschaften: „ID des Pufferlagers“, „ID des Materials“ und „geplanter Zeitpunkt der Entnahme“ bzw. „geplanter Zeitpunkt des Einlegen“. Parallel dazu besteht ein Objekt aus Daten, mit denen die Eigenschaften des Objektes beschrieben werden und Methoden, mit denen diese Daten manipuliert werden können.

Der Zustand eines Objektes besteht aus seinen Eigenschaften und den aktuellen Werten, die den Eigenschaften zugeordnet sind. Das Verhalten eines Objektes ist gekennzeichnet durch die Methoden, die auf ihm ausgeführt werden können und den daraus resultierenden Zustandsänderungen. Nur über diese operativen Methoden läßt sich der innere Zustand des Objektes verändern. Die Identität eines Objektes wird verwendet, um es von anderen Objekten zu unterscheiden. Ein Objekt ist somit durch seinen Zustand, sein Verhalten und seine Identität gekennzeichnet /84/.

Objekte mit gleichen Eigenschaften und Methoden werden zu Klassen zusammengefaßt. Ein Objekt kann also als Instanz einer Klasse betrachtet werden. Objekte einer Klasse unterscheiden sich nur durch die Ausprägung ihrer Eigenschaften voneinander. Aus diesem Grunde wird im folgenden die graphische Darstellung von Objekten auch für Klassen verwendet (Bild 24).

Klassen mit ähnlichen Merkmalen können zu Oberklassen abstrahiert werden. Dabei enthält die Oberklasse Attribute und Methoden, die ihre Unterklassen gemeinsam haben. Die Umkehrung dieses Prinzips heißt Vererbung. Das bedeutet, daß sich eine Unterklasse aus einer Oberklasse ableiten läßt und neben den Methoden und Eigenschaften der Oberklasse weitere eigene Methoden und Eigenschaften aufweist. Vererbung soll bei der Programmierung bewirken, daß neue Klassenstrukturen von bereits vorhandenen profitieren können /9/.

In der objektorientierten Programmierung wird eine Aufgabe durch die Zusammenarbeit von mehreren Objekten gelöst. Ein Programm entsteht also aus unterschiedlichen Objekten, die für die Lösung von Teilaufgaben verantwortlich sind und sich über Methodenaufrufe gegenseitig manipulieren. Objektorientierte Programme sind somit grundsätzlich modular aufgebaut. Das bedeutet zum Beispiel, daß einzelne Module (Objekte) ohne Einfluß auf den Rest des Programms ersetzt und verändert werden können, solange deren Schnittstelle nicht verändert wird. Ein weiterer Vorteil ist, daß die Programme leicht um andere Module erweitert werden können und einmal geschaffene Objekte wiederverwendbar sind. Diese Eigenschaften machen objektorientierte Programme besser wartbar, stabiler und reduzieren den Programmieraufwand.

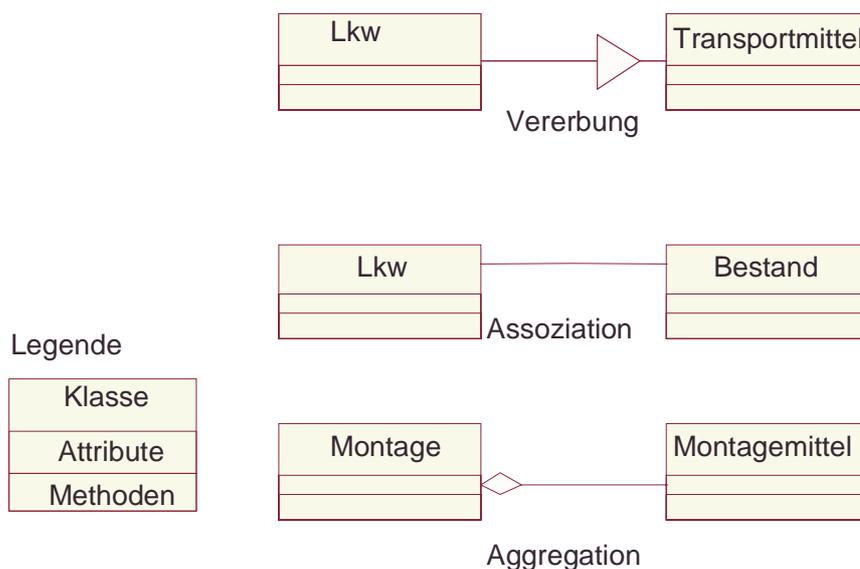


Bild 24: Symbole objektorientierter Entwicklung /84/

3.2.2.2 Common Object Request Broker Architecture (CORBA)

Bisher behandelte Objekte „leben“ nur in einem einzigen Programm. Die Vorteile der objektorientierten Programmierung auch für Kommunikationssysteme zu nutzen, führte zu der Entwicklung der *Common Object Request Broker Architecture* (CORBA), welche die Möglichkeiten der Kommunikation im Rechnernetz durch die Einführung der Objektorientierung erweitert. Dieser Standard wurde von der *Object Management Group* (OMG) entwickelt /15/.

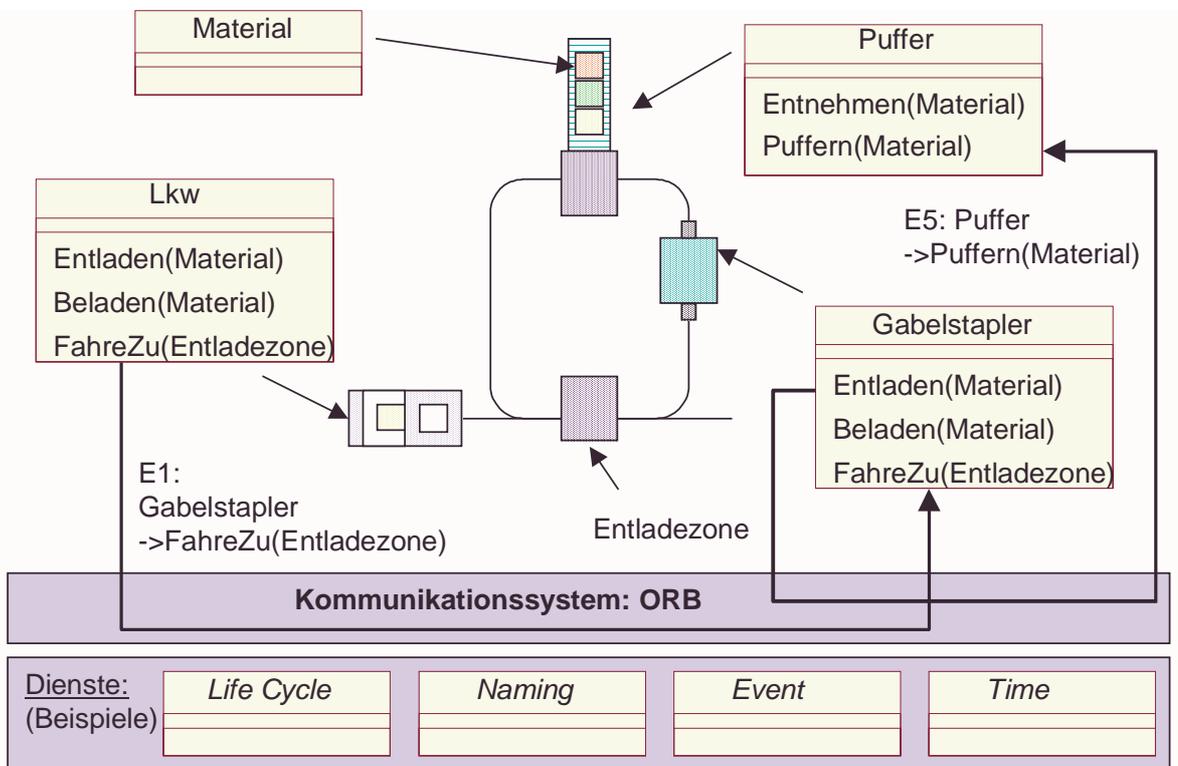
CORBA ist ein Kommunikationssystem, das Objekte über ein Rechnernetz verbindet. Objekte sind hierbei unabhängige Programme, auf die entfernte Programme über Methodenaufrufe zugreifen können. Diese müssen nicht wissen, wo sich das Objekt befindet oder unter welchem Betriebssystem es läuft. Es kann sich dabei um denselben Rechner handeln oder einen anderen Rechner im gleichen oder einem anderen Rechnernetz. Diese sogenannte Interoperabilität wird dadurch erreicht, daß Objekte die Implementierungen der Methoden kapseln und so die Eigenheiten verschiedener Betriebssysteme und die plattformabhängigen Elemente verdecken. Vorausgesetzt ist, daß die Schnittstelle, d.h. die Methoden, der Programme bekannt sind.

Die Schnittstelle dient als bindende Vereinbarung zwischen kommunizierenden Objekten. Sie wird in einer neutralen Standardsprache, der *Interface Definition Language* (IDL), abgefaßt, welche die Grenzen eines Objektes beschreibt. Zur IDL gehören die Eigenschaften einer Klasse, die Vererbungshierarchien, Ausnahmebedingungen, die sie erzeugt, und die Methoden einschließlich der Ein- und Ausgabeparameter und ihrer Datentypen /73/. Objekte, deren Schnittstellen in IDL beschrieben wurden, sind nicht mehr von Programmiersprachen, Betriebssystemen und Netzwerken abhängig. Mit IDL spezifizierte Methoden lassen sich mit jeder Programmiersprache, die CORBA-Unterstützung bietet, schreiben und aufrufen. Beispiele sind C, C++, Ada, Smalltalk, COBOL, Java und Basic.

CORBA ermöglicht es also, Objekte auf verschiedene Rechner in unterschiedlichen Netzen zu verteilen und diese über einen Mechanismus ähnlich der Funktionsaufrufe zu verbinden. Um Aufgaben über ein solches Kommunikationssystem zu lösen, sind genaue Absprachen über Art und Anzahl der beteiligten Objekte und deren Schnittstellen notwendig. CORBA stellt hierfür einen umfangreichen Satz von Diensten zur Verfügung. Dienste sind wiederum Objekte mit einer definierten Schnittstelle, die es ermöglichen, andere Objekte zu erzeugen, zu löschen, auf sie über einen Namen zuzugreifen, sie zu speichern und Verknüpfungen zwischen ihnen zu definieren /72/.

Der *Object Request Broker* (ORB) bildet die Basiskomponente des Kommunikationssystems. Er dient dazu, Client/Server-Beziehungen zwischen Objekten aufzubauen. Ein *Client* ist dabei ein Objekt, das eine Methode eines anderen Objektes aufrufen möchte. In der Regel werden die Implementierungen mehrerer Objekte zu einer Anwendung zusammengefaßt, die dann als *Server* fungiert. Bild 25 zeigt eine mögliche Verwendung. Puffer, Lkw und Gabelstapler sind als Objekte mit definierten Schnittstellen dargestellt und über einen ORB verbunden. So könnte das Objekt „Gabelstapler“ den Lkw über einen Methodenaufruf entladen, die Komponenten zum Puffer bringen und dort über einen Methodenaufruf ablegen.

Methodenaufrufe unterscheiden sich in der Hinsicht von den Funktionsaufrufen, daß der Zustand des Objektes für das Ergebnis mit ausschlaggebend ist, während Funktionsaufrufe per Definition unabhängig von den Daten betrachtet werden. Des weiteren können über den gleichen Mechanismus interne und externe Objekt netze verknüpft werden. So kann beispielsweise eine Anfrage gleich weitergereicht werden an das Objekt Lkw. In Abhängigkeit vom Zustand der Objekte, wie Position, Richtung oder bereits angenommene Aufträge, liefern die gleichen Methoden je nach Objekt unterschiedliche Ergebnisse.



Ereignisse: E1 Ankunft Lkw \longrightarrow Methodenaufruf
 E5 Ankunft Gabelstapler (Einschleusen)

Bild 25: Kommunikation in CORBA

3.2.2.3 High Level Architecture (HLA)

Der CORBA-Ansatz ermöglicht Simulationssysteme zu starten und den Austausch von Daten zu verwalten. Eine zeitliche Synchronisation der Simulationssysteme kann nicht stattfinden, ist aber notwendig. Die High Level Architecture (HLA) vom Amerikanischen Verteidigungsministerium stellt hierfür Mechanismen zur Verfügung. HLA ist eine Schnittstellenbeschreibungssprache und Architektur für die Koordination verteilter Simulationsanwendungen /21/, /22/, /23/. Das Ziel ist die Wiederverwendbarkeit und Interoperabilität von Simulationsmodellen, Simulationssystemen und Programmen.

Die militärische Herkunft zeigt sich in den verwendeten Begriffen. So sind Federates Teilnehmer an einem gemeinsamen Simulationslauf der sogenannten Federation. Die Federation stellt das gemeinsame vertragliche Dach dar, das bestimmt, was jeder Teilnehmer zur Simulation beiträgt und was er von anderen erwarten kann. Diese für die Federation relevanten Daten sind Objekte gemäß der objektorientierten Methodik.

HLA besteht aus drei Bestandteilen:

- Der Run Time Infrastructure (RTI), welches ein Kommunikationssystem ist, das Koordinationsdienste über Internet den Federates zur Verfügung stellt, durch die das Zusammenspiel und das Verhalten der gesamten verteilten Simulation (Federation) und der Teilnehmer (Federates) gelenkt werden kann,
- einer Schnittstellenspezifikation, welche die Schnittstellen zwischen den Federates und der Runtime Infrastructure (RTI) definiert,
- dem Object Model Template (OMT), das Standards zur Dokumentation von Federations und Federates vorsieht /93/.

In HLA erfolgt eine Trennung zwischen Simulationsfunktionalität des Federates und der Interoperabilität. Das bedeutet, daß sich Federates nicht um die zeitliche Synchronisation und die Implementierung des Nachrichtenaustausches kümmern müssen. Die Infrastruktur, die die hierfür notwendigen Dienste zur Verfügung stellt, ist die Run-Time-Infrastructure (RTI). Bild 26 zeigt die Architektur und die den Federates zur Verfügung gestellten Dienste. Federates sind eigenständige Simulationssysteme, die Nachrichten über ihre Objekte wie Lkw, Gabelstapler und Puffer auf der Run-Time-Infrastructure austauschen. Beispielsweise könnten der Gabelstapler und der Puffer zum Federate „Montage“ und der Lkw zum Federate „Transport“ gehören (siehe Bild 16).

Das Serverprogramm, das im Hintergrund abläuft, wird RTIExec genannt. Bei diesem Programm melden sich die Federates an und erfahren, auf welchem Rechner das FedEx-Programm läuft. Für jede Federation wird ein FedEx-Programm gestartet, dem die Verwal-

tung des Datenaustausches zwischen den Federates derselben Federation obliegt. Hierfür stehen folgende Dienste zur Verfügung:

- *Federation Management*: Hier stehen grundlegende Funktionen zum Erzeugen und Entfernen des FedEx-Prozesses sowie zum Aus- und Eintritt von Federates bereit. Zudem werden Funktionen zum Anhalten, Speichern, und Wiederherstellen des Federation-Zustandes definiert.
- *Declaration Management*: Hierzu gehören Aufgaben, wie das Bekanntgeben der Klassen wie z. B. Lkw oder Gabelstapler, zu denen ein Federate etwas beitragen kann oder das Abonnieren der Klassen, über die ein Federate informiert werden möchte.
- *Object Management*: Aufgabe ist es, Objekte und deren Eigenschaften zwischen den Federates auszutauschen. Die zeitliche Ordnung der Interaktionen wird verwaltet.
- *Ownership Management*: Federates dürfen nur Attribute der eigenen Objekte verändern. Es sei denn, sie einigen sich über diese Rechte. Das gehört zu den Aufgaben des Ownership Managements.

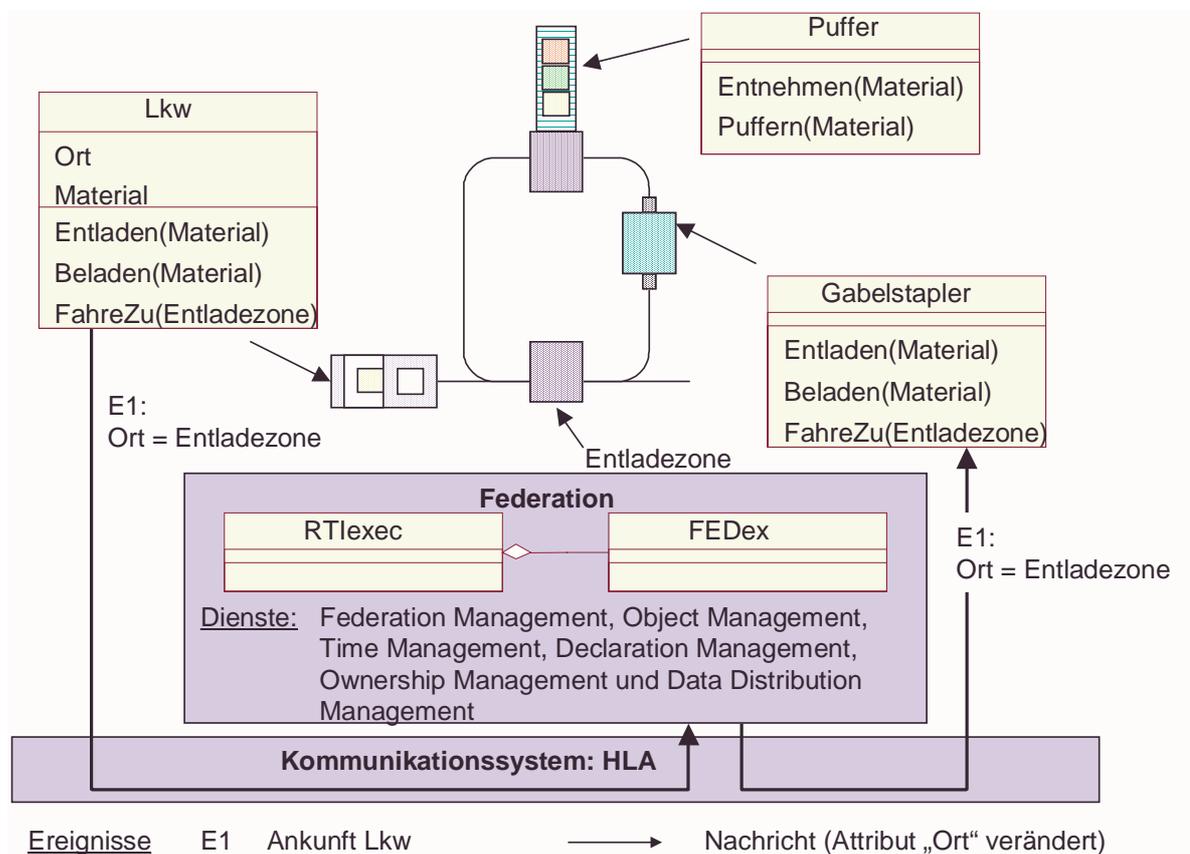


Bild 26: Run Time Infrastructure (RTI)

Bild 27 gibt einen Überblick über die Abfolge der Funktionen für die Zusammenarbeit verschiedener Simulationssysteme. Beispielhaft soll das Simulationssystem „Transport“ betrachtet werden, welches das Simulationssystem „Montage“ über die Ankunft eines Lkws informiert. Hierfür erfolgt zunächst das Eintreten in eine Federation durch die Methoden „create“ und „join“ des Botschafter-Objektes der Federation. Simulationssystem und Federation kommunizieren über sogenannte Botschafter-Objekte. Im zeigt die Pfeilrichtung an, welches Botschafter-Objekt gemeint ist. Ein Pfeil in Richtung Federation bedeutet einen Aufruf der Methode des Botschafter-Objekts des Federation, ein Pfeil in anderer Richtung ein Aufruf der Methode des Botschafter-Objekts des Simulationssystems.

Ein wichtiger Teil der Schnittstellen sind die Beschreibung der Eigenschaften der Objekte. Ein Objekt, das zur Schnittstelle gehört, kann als ein Sender angesehen werden, der Nachrichten über seine Eigenschaften an alle sendet, die daran interessiert sind. Ein

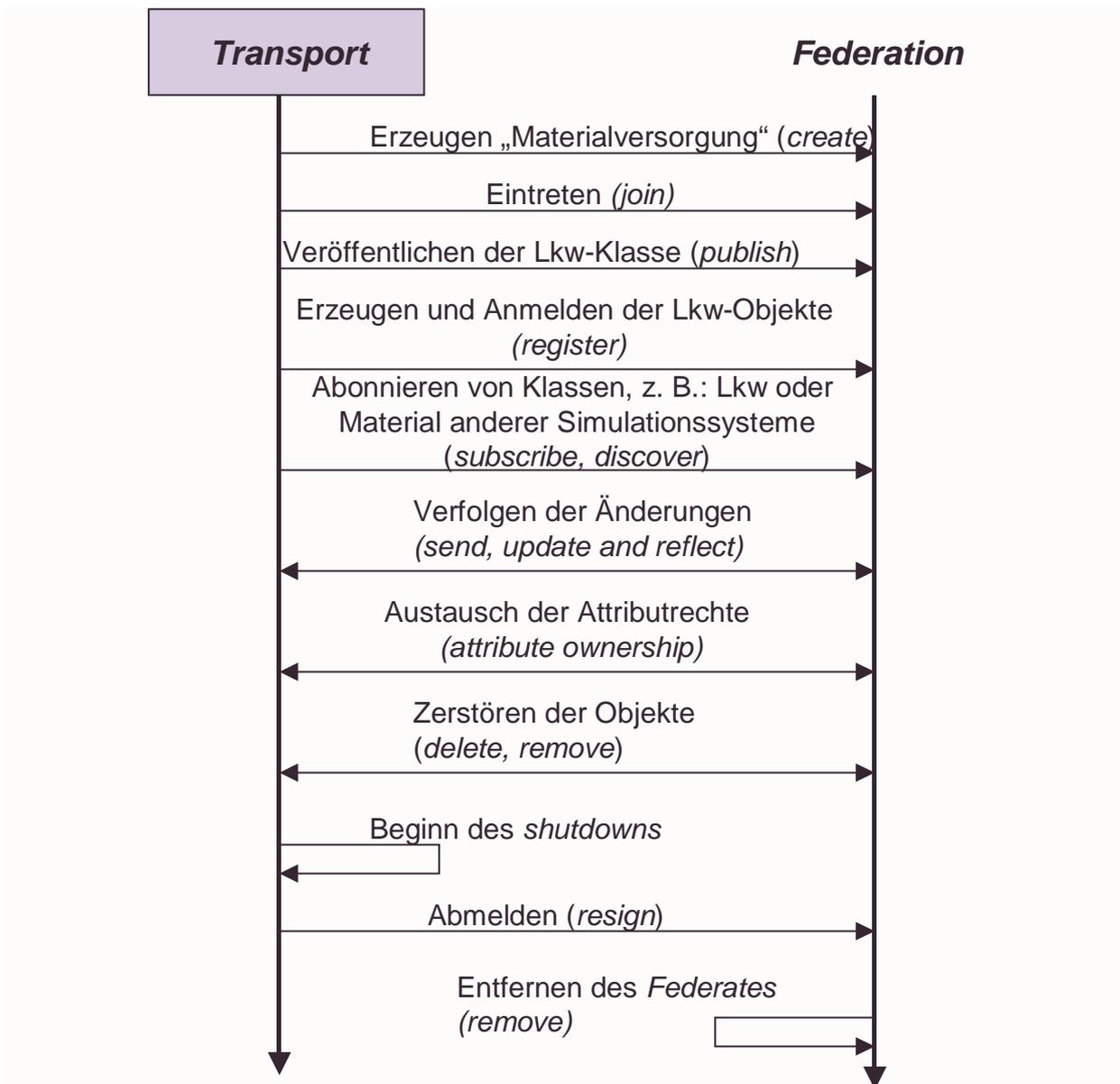


Bild 27: Überblick über die Abfolge von Aufgaben nach /21/

Simulationssystem gibt solche Objekte der Federation durch die Methoden „publish“ und „register“ bekannt. Im Beispiel erfolgt die Bekanntgabe des Lkw-Objekts (siehe auch Bild 26) durch das Simulationssystem „Transport“. Ein Simulationssystem, das über Veränderungen eines Objekts wie z. B. des Lkw-Objekts informiert werden möchte, meldet dieses Interesse durch die Methode „subscribe“ bei der Federation an und wird durch „discover“ über die Objekte andere Simulationssysteme bzw. durch „send“, „update“ und „reflect“ über die Attributwerte der Objekte informiert. Weitere Methoden stehen zum Verlassen einer Federation zur Verfügung. Neben einer solchen 1-zu-n Kommunikation stehen den Simulationssystemen auch eine direkte Kommunikation über Nachrichten zur Verfügung. Ein grundlegender Unterschied zu CORBA ist dementsprechend, daß Interaktionen zwischen den Objekten als Nachrichten und nicht als Methodenaufrufe verstanden werden. Nachrichten zeigen Veränderungen in den Werten der Eigenschaften der Objekte beispielsweise des Lkw-Objektes an.

Eine Hauptaufgabe ist die zeitliche Koordination der Zusammenarbeit unterschiedlicher Federates im Time Management. Dieses Zeitmanagement ist Voraussetzung für die Interoperabilität zwischen Simulationssystemen, da es durchaus darauf ankommt, zeitsynchron zu laufen. HLA läßt es jedem *Federate* offen, wie er am Zeitmanagement der *Federation* teilnimmt. Hierzu gibt es zwei grundlegende Schalter. Möchte das *Federate* aktive sich an der Zeitermittlung beteiligen, ist der Schalter (*time regulating*) zu setzen. Dadurch wird der Federate in die Lage versetzt, Ereignisse mit Zeitmarken zu erzeugen. Zur Unterordnung in die Regie zum Zeitfortschritt ist der Schalter (*time constraint*) verantwortlich. Ist dieser Schalter gesetzt, muß der Federate den Zeitfortschritt bei der Federation beantragen. Bild 28 zeigt die Abfolge von Schritten zur Synchronisation mit Hilfe der ereignisorientierten Vorgehensweise. Zunächst ermitteln beide Simulationssysteme, Montage und Transport, das nächste lokale Ereignis. So beantragt die Montage einen Zeitfortschritt zum Ereignis E10 und der Transport zum Ereignis E7. Daraufhin wird von HLA das nächste zu verarbeitende Ereignis anhand der Zeitmarke festgelegt und den Simulationssystemen der Zeitfortschritt zum nächsten Ereignis E7 mitgeteilt. Nach der Verarbeitung des Ereignisses beginnt die geschilderte Prozedur von neuem.

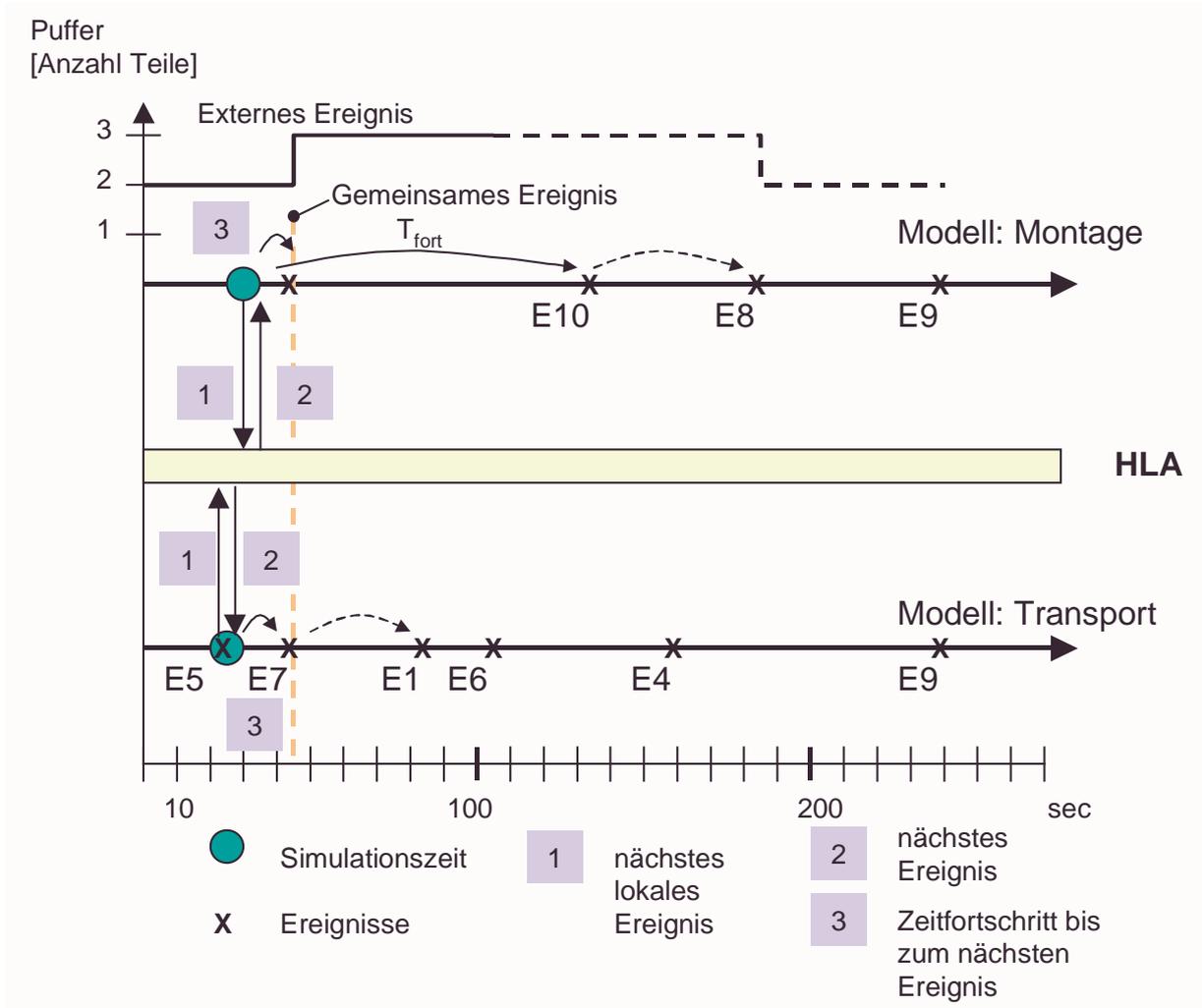


Bild 28: Beantragen des Zeitfortschritts

3.2.3 Agentenbasierte Systeme

3.2.3.1 Agenten

Übergeordnete Planungs- und -steuerungssysteme geben Steuerungsbefehle an verschiedene Standorte oder Werkstätten weiter, die dann diese Steuerungsbefehle für die Arbeitsplätze detaillieren. PPS Systeme verfügen hierfür über mächtige Planungsalgorithmen, während auf der operativen Ebene einfache Algorithmen zur Verfügung stehen, z. B. Prioritätsregeln zum abarbeiten von Warteschlangen. Simulationssysteme für die Produktion bieten eine Auswahl von einfachen Algorithmen. So können sich Ressourcen Aufträge aus einer Warteschlange heraussuchen oder Aufträge sich eine geeignete Ressource auswählen. Kopplung von Simulationssystemen setzt voraus, daß Steuerungsalgorithmen über Systeme hinweg greifen. In dem Beispiel ist der Lkw ein Element des Transports am Übergang zur direkten Versorgung. Eine geeignete Entladezone zu finden, kann hier durch Interaktion zwischen den Simulationssystemen erreicht werden. In der Versorgung sind die aktuellen und die erwarteten Auslastungen bekannt, ebenso wie die Situation am Band. Der

Lkw kennt die genaue Belegung mit Komponenten. Interaktionen werden durch Kommunikationsregeln festgelegt. In agentenbasierten Systemen wird darauf Bezug genommen.

Ein idealer Agent sollte sein Ziel kennen, und bestrebt sein, es auch zu erreichen. Zudem sollte er robust und anpassungsfähig sein, aus Erfahrungen lernen und autonom sein, das heißt, seine Umwelt kennen und wahrnehmen und daraufhin selbständig entscheiden können, mit welchen Betriebsmitteln er Aufgaben erledigt. Diese Fähigkeiten werden in der Literatur mit Proaktivität (Zielorientiertheit), Lernfähigkeit, Kooperation und Autonomie wiedergegeben /6/. Es besteht auch die Tendenz, Agenten einen „Charakter“ oder „soziales Verhalten“ zu geben.

Es ist zwar nicht schwer, „zu beschreiben, was ein Agent tun soll, einen zu programmieren dagegen sehr“ /62/, denn man benötigt dafür einige Grundvoraussetzungen. So muß der Agent die Möglichkeit haben, Wissen zu erwerben und es zu speichern, ebenso eine Sprache sprechen, die andere Agenten auch verstehen können. Dazu gehört auch, daß Computernetzwerk zu nutzen, um mit anderen Agenten in Kontakt zu treten. Ähnlich wie es Computerviren tun, kann es auch dazu gehören, sich selbst zu einem anderen Computer zu begeben.

Deliberative Agenten zeichnen sich durch zwei Dinge aus. Sie haben ein explizites symbolisches Modell der Umwelt und die Fähigkeit zur logischen Schlußfolgerung. Das setzt eine Wissensbasis voraus, die auch als interner oder mentaler Zustand des Agenten bezeichnet wird /11/. Dieser setzt sich aus drei Grundkomponenten zusammen: Überzeugungen (engl. *Belief*), Wünsche (engl. *Desire*) und Intentionen (engl. *Intention*). Daher auch die Bezeichnung BDI-Agenten (Bild 29). Neuere Ansätze fügen hierzu weitere Komponenten hinzu: Ziele (engl. *Goal*) und Pläne (engl. *Plan*), so daß diese Agenten fünf Komponenten haben, die den mentalen Zustand eines Agenten bestimmen.

Prinzipiell lassen sich die zentralen Probleme der klassischen KI auch auf den Ansatz deliberativer Agenten übertragen. Entscheidungen basieren auf einem symbolischen Modell der Umwelt, das einmal aufgebaut nur begrenzt aktualisiert wird. Dazu trägt der relativ zeitintensive Übergang zwischen einzelnen Planungsphasen (BDI Agent) bei. Im Vordergrund stehen hier korrekte bzw. optimale Ergebnisse. In einer dynamischen Umgebung, wie z. B. in der Materialversorgung, sind meist schnelle Reaktionen mit guten Ergebnissen geeigneter, als zu spät erzielte optimale Ergebnisse. Das ist der Ansatzpunkt reaktiver Agenten.

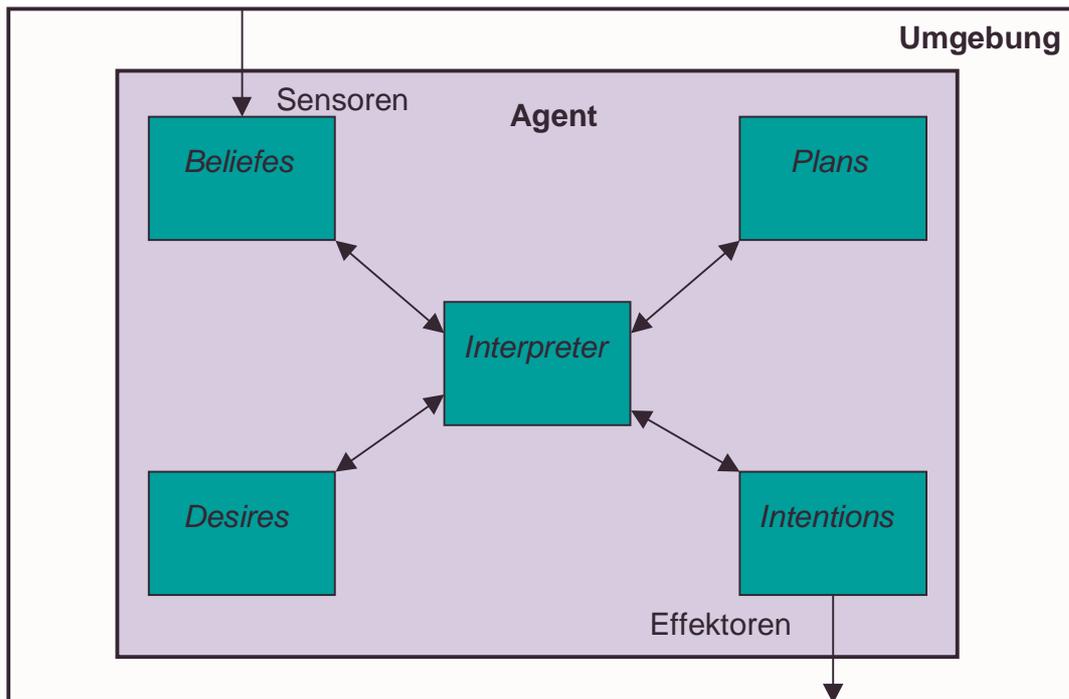


Bild 29: Schema eines BDI-Agenten /11/

Reaktive Agenten besitzen keine symbolischen Modelle und damit auch nicht die Fähigkeit der logischen Schlußfolgerung. Im Vordergrund steht hier eine schnelle Interaktion mit der Umwelt. Intelligenz entsteht prinzipiell nicht durch einen Agenten, sondern durch das Zusammenwirken verschiedener Agenten /12/. Es reicht aus, um in einer komplexen Umwelt zu agieren, ein paar einfache Grundsätze oder Abhängigkeiten zu erkennen. Da diese Agenten jedoch nicht die Fähigkeit haben, Pläne zu erstellen, gibt es Ansätze die beide Formen in sich zu integrieren versuchen. Das sind hybride Agenten.

3.2.3.2 Sprache

KQML

Nach AUSTIN beinhaltet eine Nachricht, ein Sprechakt, mehr als nur eine Aussage, die wahr oder falsch sein kann. Vielmehr übt ein Sprechakt einen direkten Einfluß auf die Umgebung aus. So differenziert AUSTIN zwischen dem Aussprechen einer Nachricht (lokutionärer Akt), dem Verstehen bzw. Interpretieren der Nachricht (illokutionärer Akt) und den Auswirkungen der Nachricht auf die Umwelt (perlokutionärer Akt) /4/.

Sprechakttypen zu definieren, bietet die Möglichkeit, Kommunikation zwischen Agenten zu formalisieren. Die am weitesten verbreitete Kommunikationssprache für Agentensysteme ist die *Knowledge Query and Manipulation Language* (KQML). Hier werden beispielsweise folgende Sprechakttypen definiert: *ask-about* – eine Anfrage, *tell* – Informationsübermittlung, *achieve* – Vorgabe eines Zieles. Ist den Agenten der Sprechakttyp bekannt, kann ent-

(<performative>	Bezeichnung des Sprechakttypes
:content <statement>	Inhalt der Nachricht
:sender <name>	Name des Senders
:receiver <name>	Name des Empfängers
:language <text>	verwendete Syntax der Nachricht, z.B. SQL
:ontology <text>	fachspezifisches Wörterbuch
)	

Bild 30: Grundstruktur eines Sprechaktes /11/

sprechend reagiert werden. KQML unterscheidet drei Ebenen: Übertragung, Sprechakttyp und Inhalt. Zur Übertragung gehören die technischen Voraussetzungen einer Interprozeßkommunikation. Bild 30 zeigt die Grundstruktur eines Sprechaktes. Dieser Rahmen kann mit beliebigen Inhalten gefüllt werden.

Mit der Definition von Sprechakten lassen sich jedoch nicht alle Probleme lösen. Agenten führen Unterhaltungen, an denen mehrere andere Agenten beteiligt sein können, beispielsweise zur Lösung einer Aufgabe. Ein Problem besteht darin, daß Agenten nicht unbedingt wissen müssen, wo sie welche Information bekommen. In KQML gibt es deshalb den Vermittler oder *Broker*. Ein Dialog zweier Agenten kann über einen solchen Broker erfolgen. Dafür werden zwei weitere Sprechakttypen benötigt: *broker* und *advertise*. Ein Agent kann sein Wissen über den Sprechakt *advertise* dem Broker bekannt machen. Anfragen anderer Agenten werden über den Broker beantwortet (Bild 31).

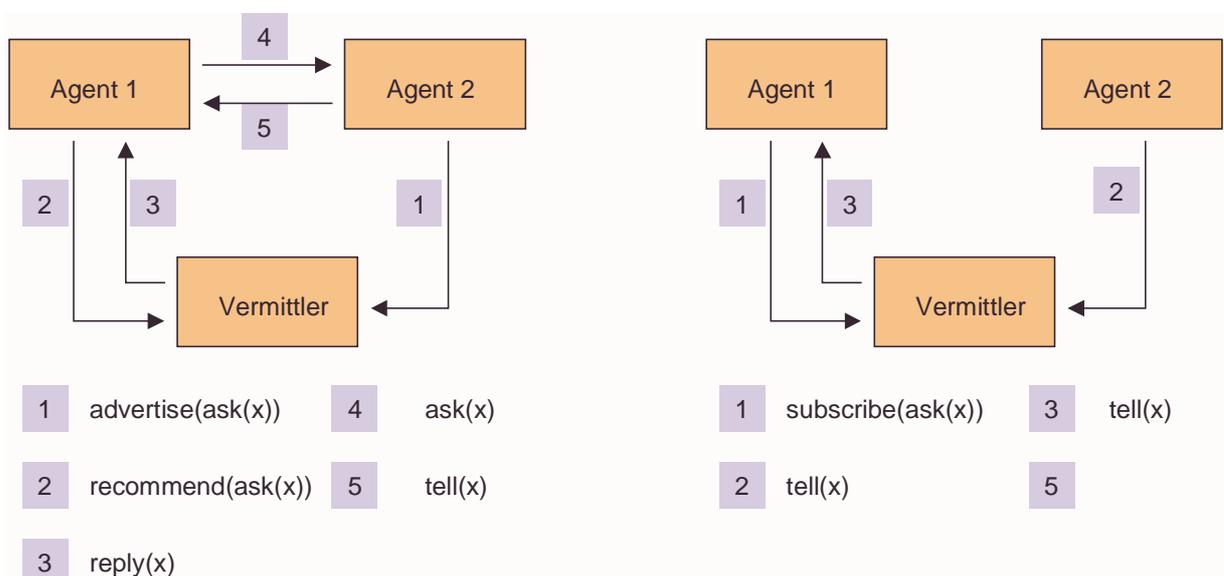


Bild 31: Kommunikationsvarianten in KQML /11/

Elektronischer Datenaustausch (EDI)

Simulationssysteme für die Materialversorgung zu koppeln bedeutet letztendlich auch, Daten zwischen beteiligten Partnern, wie Transportunternehmer, Zulieferant und Finalmontage, auszutauschen. Hierfür wurden bereits einige Protokolle entwickelt (Bild 32). *Electronic Data Interchange* (EDI) ist in Abgrenzung zu anderen Protokollen ein standardisiertes Datenformat für den Austausch von Geschäftsinformationen. Daran haben in den letzten Jahren Normierungsgremien in allen Teilen der Erde gearbeitet.

Die Entwicklung von EDI wurde jedoch nicht zentral koordiniert. Daher entstanden je nach Branche und Land abweichende EDI-Formate. Zur Zeit gelten in den USA der ANSI X.12-Standard und in Europa der *Tradecoms*-Standard der *Article Numbering Association* als die jeweiligen regionalen Referenzstandards sowie *Electronic Data Interchange for Administration, Commerce and Transportation* (EDIFACT) als internationaler Standard, der beide vereinheitlichen soll.

Mit dem EDIFACT-Protokoll sollen durch exakte Definitionen die diversen Lösungen mehrerer Partner so aufeinander abgestimmt werden, daß Mißverständnisse und Fehlinterpretationen vermieden werden. Daten, die mit dem EDIFACT-Standard übertragen werden, besitzen immer eine einheitliche Struktur. Die Syntax enthält die Regeln, nach denen die ausgetauschten Daten unabhängig von der verwendeten Hard- und Software der Kommunikationspartner strukturiert und in entsprechende Datenelemente reduziert werden. Dazu werden die zu übertragenden Daten hierarchisch in Nachrichtengruppen, Nachrichten und Segmente gegliedert (siehe Bild 33).

Das *Datenelement* ordnet einen Begriff wie „Name des Versenders“ einer Menge von klassifizierten Zeichen (z.B. „FirmaXYZ“) zu. Das *Segment* ist ein System von einzelnen Daten-

	Handelsdaten		Produktdaten		Textdaten
branchen- bezogen	ANSI X.12	EDIFACT	IGES	STEP	ODA/ODIF
	TRADACOMS			SET	
branchen- bezogen	VDA	ODETTE CEFIC EDIFICE RINET	VDAFS	CAD-I*	DTAM
	SEDAS				
	national	Inter- national	national	Inter- national	

Bild 32: Standards für den Handels-, Produkt- und Textaustausch /77/

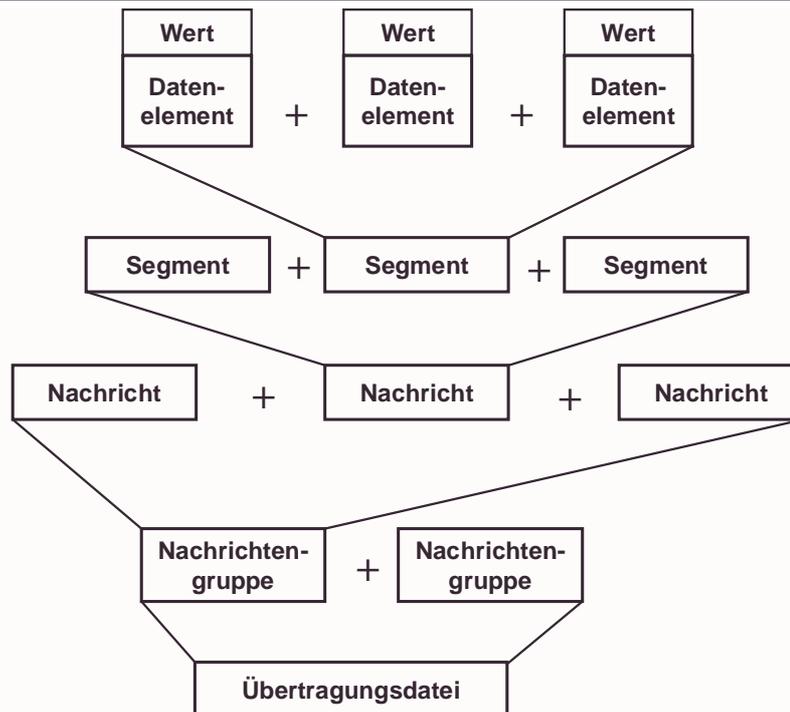


Bild 33: Struktur des EDIFACT-Standards

elementen. Beispielsweise kann ein Segment „Zahlungsbedingung“ aus den Datenelementen „Datum“, „Zahlungstermin“ und „Rabatt“ bestehen. Eine *Nachricht* setzt sich aus Segmenten zusammen, die auf einen Typ von einem definierten Vorgang oder Prozeß ausgerichtet sind, z.B. „Rechnung“. Werden Nachrichten desselben Typs zum selben Empfänger übertragen, so können diese zu einer *Nachrichtengruppe* zusammengefaßt werden.

Nachrichten zwischen den Simulationssystemen könnten auf EDIFACT Standard basieren. Beispielsweise lassen sich so Anfragen und Angebote (QUOTES), Aufträge an die Zulieferanten (ORDERS), Veränderungen der Aufträge (ORDCHG), Lieferabrufe (DELFOR) übermitteln. Damit stehen semantischen Betriebsmittel im Sinne der Kommunikation zur Verfügung, um Verhandlungen auch zwischen einem Lkw und Gabelstapler, die zum Entladen in Frage kommen, nachzubilden (siehe Bild 14). Der Lkw und die Gabelstapler verständigen sich durch „QUOTES“ über das aktuelle Angebot an Leistungen. Danach erhält ein Gabelstapler den Zuschlag (ORDERS).

Der EDIFACT Standard ist in die Darstellungs- und Anwendungsschicht einzuordnen /77/, ist also insofern abhängig von weiteren Schichten im ISO-OSI Referenzmodell. Früher wurden EDI-Transaktionen über geschlossene Netzwerke übermittelt. Zunehmend werden aber auch die Internet-Protokolle sowie auf diesen Protokollen basierende Intranets und Extranets als Datenträger für EDI eingesetzt. Des weiteren handelt es sich hierbei um eine 1-zu-1 Kommunikation. Das Protokoll geht also nicht über das Regelwerk zur Definition von Nachrichten hinaus, um beispielsweise kompliziertere Kommunikationsschemen zu behandeln, wie z. B. Verhandlungen. So könnte eine Verhandlung wie folgt aussehen: eine An-

frage wird an mehrere Zulieferanten geschickt und beantwortet und dann erfolgt eine Auswahl der eingegangenen Angebote sowie die Zusage bzw. Ablehnung.

3.2.3.3 Koordinationsformen

Sprechakte geben keine Ordnung oder Koordination der Unterhaltung vor. Einer Kooperation liegen, sofern sie über Sprache geführt wird, kompliziertere Kommunikationsmechanismen zur Grunde. DURAN unterteilt die kommunikativ geführte Kooperation in deliberative und verhandlungsorientierte Systeme /26/. Kooperative Lösungen orientieren sich an Organisationen. Beispielsweise schlagen KORNFELD und HEWIT die wissenschaftliche Zusammenarbeit als Grundlage für die Koordination von Agenten vor /49/. Aufgaben werden eigenständig bearbeitet und in einem kritischen Dialog überprüft. Ein Verfahren dieser Kategorie ist das *Partial Global Planning* (PGP) /27/. Grundvoraussetzung ist ein übergeordnetes Gesamtproblem. Die beteiligten Agenten lösen jeder für sich ein Teil des Gesamtproblems. Dafür können sie Informationen über den Zustand anderer Agenten, die ebenfalls an einem Teil sitzen, verwenden und Rückschlüsse auf die eigene Arbeit ziehen. Daher auch die Bezeichnung *Partial*. Mit dem speziellen partiellen Wissen eines Agenten werden durch Austausch von Ergebnissen globale Pläne zur Lösung des Gesamtproblems erstellt.

Einen anderen Ansatz bieten kompetitive Verfahren. Es sind marktähnliche Verfahren. Teilaufgaben werden öffentlich ausgeschrieben. Jeder Agent kann sich um die für ihn interessanten Aufgaben bewerben. IWATA und ONOSATO nennen ein Beispiel /45/. Ein Auftragskoordinator schreibt Aufträge aus. Maschinenagenten verfolgen die Ausschreibung und generieren schließlich einen Auftragsagenten, der sich um den Auftrag bewirbt. Auf diese Weise werden Entscheidungssituationen in Unternehmen nachgebildet. Der Einkauf holt sich mehrere Angebote ein und entscheidet sich dann für das beste.

Ein Verfahren, das diese Vorgehensweise widerspiegelt, ist das Kontraktnetzverfahren. Grundlage ist das Kontraktnetzprotokoll, das ein einheitliches Nachrichtenformat definiert, welches von allen Agenten verstanden werden muß /98/. Ein Agent, der an einem Kontraktnetz teilnimmt, muß mit drei wesentlichen Komponenten ausgestattet sein. Erstens benötigt er eine Wissensbasis, in welcher der aktuelle Status von Kooperationsverhandlungen und des Problemlösungsprozesses abgelegt wird. Zweitens benötigt er eine koordinierende Komponente, welche die aktuellen Ausschreibungen verfolgt, Verträge abschließt und deren Einhaltung überprüft. Drittens gibt es eine Komponente, die mit der eigentlichen Durchführung beauftragt wird (Bild 34). Für einen Agenten, der für die Steuerung eines Lkws verantwortlich ist, kann es bedeuten, daß die durchführende Komponente den Weg planen muß. Über die Wissensbasis erhält sie Informationen über den aktuellen Zustand, Position und Termine der Aufträge. Die Kontraktkomponente nutzt diese Informationen um weitere Verträge abzuschließen, d.h. Aufträge zu bekommen.

Im Kontraktnetzprotokoll sind Dialoge fest vorgegeben. Sollen komplizierte Dialoge selbst entworfen werden, kann dies über Regeln geschehen. Einen objektorientierten Ansatz wählen hier BARBUCEANU und FOX mit der Coordination Language (COOL) /7/. Für jeden Dialog wird eine sogenannte Conversation-Klasse erzeugt, die für die Durchführung eines Dialoges verantwortlich ist. Wie der Agent reagiert, wird in den Conversation-Regeln festgelegt. Die Implementierung nutzt diesen Ansatz geschickt, in dem für jeden beginnenden Dialog ein eigenständiges Conversation-Objekt gestartet wird.

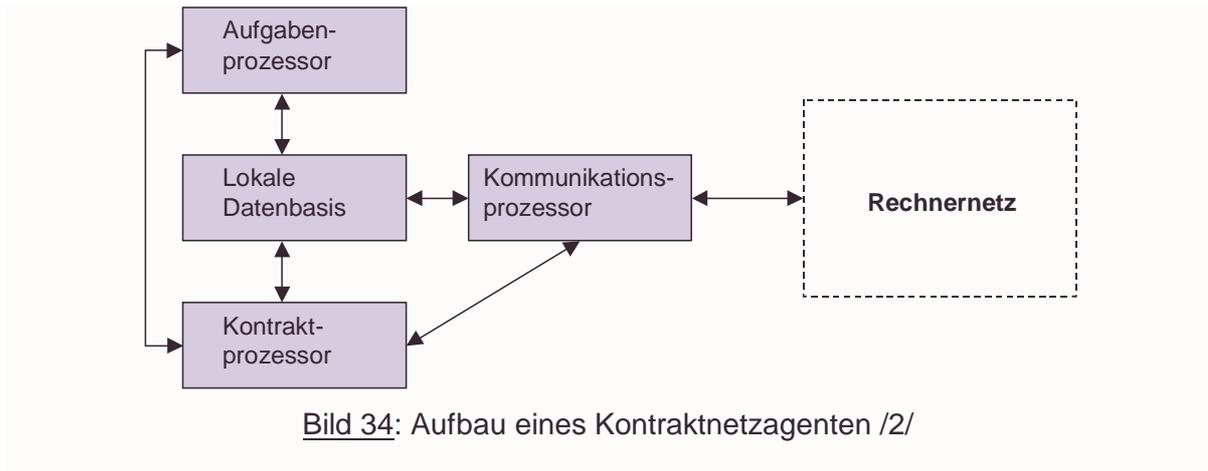


Bild 34: Aufbau eines Kontraktnetzagenten /2/

4 Defizite und Lösungsansatz

Die Untersuchung gängiger Simulationssysteme in der Produktion zeigt, daß traditionell alle als unabhängige Simulationssysteme ausgelegt sind. Unabhängig bedeutet in diesem Zusammenhang, daß eine Kopplung mit anderen Simulationssystemen über ein Kommunikationssystem nicht vorgesehen ist. Das bedeutet, daß der Materialversorgungsprozeß nicht durch eine Kopplung der Simulationssysteme „Zulieferant“, „Transportunternehmer“ und „Finalproduzent“ simuliert werden kann.

Bild 35 stellt eine typische Simulationsanordnung dar, wie sie z. B. in /111/ beschrieben wird. Beginnend mit der Zieldefinition wird durch Simulationsexperimente ein geeigneter Maßnahmenkatalog entworfen. Die Experimente werden an *einem* Simulationssystem durchgeführt, welches das gesamte Modell des Materialversorgungsprozesses mit den Subsystemen der Zulieferanten, Transportunternehmer und Finalproduzenten enthält. Ebenso ist *ein* Experimentiersystem für die Planung und Durchführung der Experimente erforderlich. Als logische Folge haben alle Partner, wie Zulieferanten, Transportunternehmer und Finalproduzent, Einblick in die Modelle der anderen und deren Parameter.

Eine Kopplung der Simulations- und Experimentiersysteme würde den Partnern ermöglichen, das eigene Modell und dessen Parameter vor den Partnern zu verbergen und trotzdem an einer Simulation des gesamten Materialversorgungsprozesses teilzunehmen. Wei-

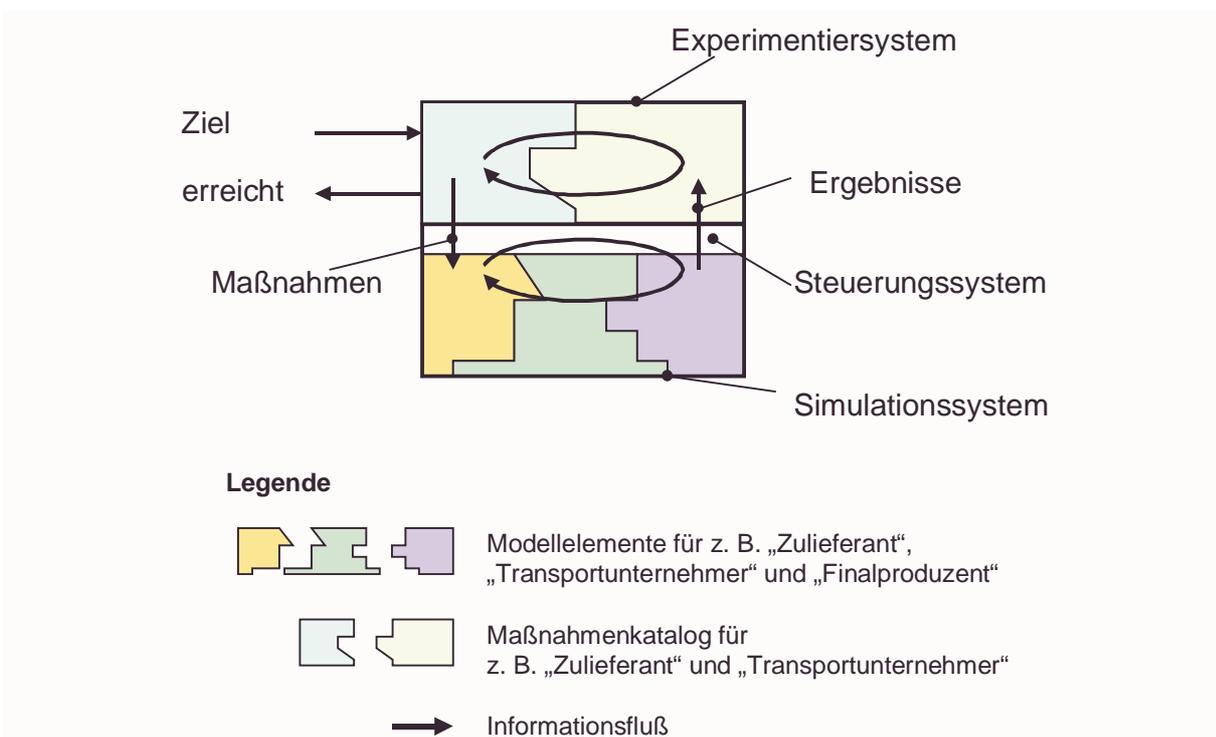


Bild 35: Simulationsanordnung

tere Vorteile sind in Kapitel 2.3.2 zu finden. Für die verteilte Simulation dynamischer Materialversorgungsprozesse in Produktionsverbänden sollen die Simulations- und Experimentiersysteme der Partner gekoppelt werden.

Bei der Grundvoraussetzung für eine Kopplung handelt es sich um eine Programmierschnittstelle, welche die meisten in der Produktion eingesetzten Simulationssysteme besitzen. Simulationssysteme zu koppeln, bedeutet zudem, ihren zeitlichen Fortschritt so zu überwachen, daß alle Ereignisse zur richtigen Zeit verarbeitet werden. Zur Koordination des Zeitfortschritts eignet sich die Vorgehensweise mit zentralem Zeitregime. Gegen eine dezentrale Vorgehensweise spricht, daß kein in der Produktion eingesetztes Simulationssystem Mechanismen zum Wiederherstellen eines alten Simulationszustands besitzt. Des Weiteren erlauben nicht alle Simulationssysteme einen Eingriff in die Ereignisschleife. Da hiervon die richtige zeitliche Verarbeitung der Ereignisse abhängt, ist dieser Eingriff für die Kopplung wünschenswert. Neuere Versionen herkömmlicher Simulationssysteme für die Produktion, wie PROMODEL /79/ oder allgemeine Simulationssysteme, wie SLX /44/ besitzen diese Möglichkeit.

Simulationssysteme haben eine sehr enge Bindung an das Experimentiersystem. Das liegt daran, daß spezifisches Wissen erforderlich ist, um die Aufgaben eines Experimentiersystems wahrzunehmen, wie das Initialisieren und Starten von Simulationsläufen, Ergebnisse auszuwerten und graphisch zu veranschaulichen sowie die Parameterkonstellation automatisch oder interaktiv mit dem Benutzer zu verbessern. Einige wurden entwickelt, doch deren Umsetzung meist nur auf ausgewählte Simulationssysteme beschränkt. Beispiel hierfür ist das Simulationssystem AUTOMOD /5/, das ein eigenes Experimentiersystem besitzt. Das Experimentiersystem SIMPAD /92/ bietet eine allgemeine Schnittstelle zu Simulationssystemen. Zusammenfassend läßt sich sagen, daß mit den zur Verfügung stehenden Simulationssystemen eine verteilte Simulationsanordnung realisierbar ist.

Zu einer verteilten Simulationsanordnung gehört auch ein Kommunikationssystem, welches für die Interaktionen zwischen den Simulations- und Experimentiersystemen zuständig ist. Zu diesen Interaktionen zählen die zeitliche und logische Koordination, die Steuerung des Materialflusses sowie ein Vermittlungsdienst. Bild 36 zeigt eine verteilte Simulationsanordnung. Die Simulationssysteme entsprechen jetzt den Subsystemen aus Bild 35. Es wird ersichtlich, daß der Informationsfluß zwischen den Simulations- und Experimentiersystemen zeitlich und logisch koordiniert werden muß. Unter zeitlicher Koordination soll verstanden werden, daß alle Ereignisse in der verteilten Simulationsanordnung zur richtigen Zeit verarbeitet werden. Die logische Koordination stellt sicher, daß alle Simulations- und Experimentiersysteme die für sie relevanten Ereignisse erhalten.

Neben der zeitlichen und logischen Koordination ist die Steuerung des Materialflusses für das semantische Zusammenspiel der einzelnen Simulationssysteme verantwortlich. Der

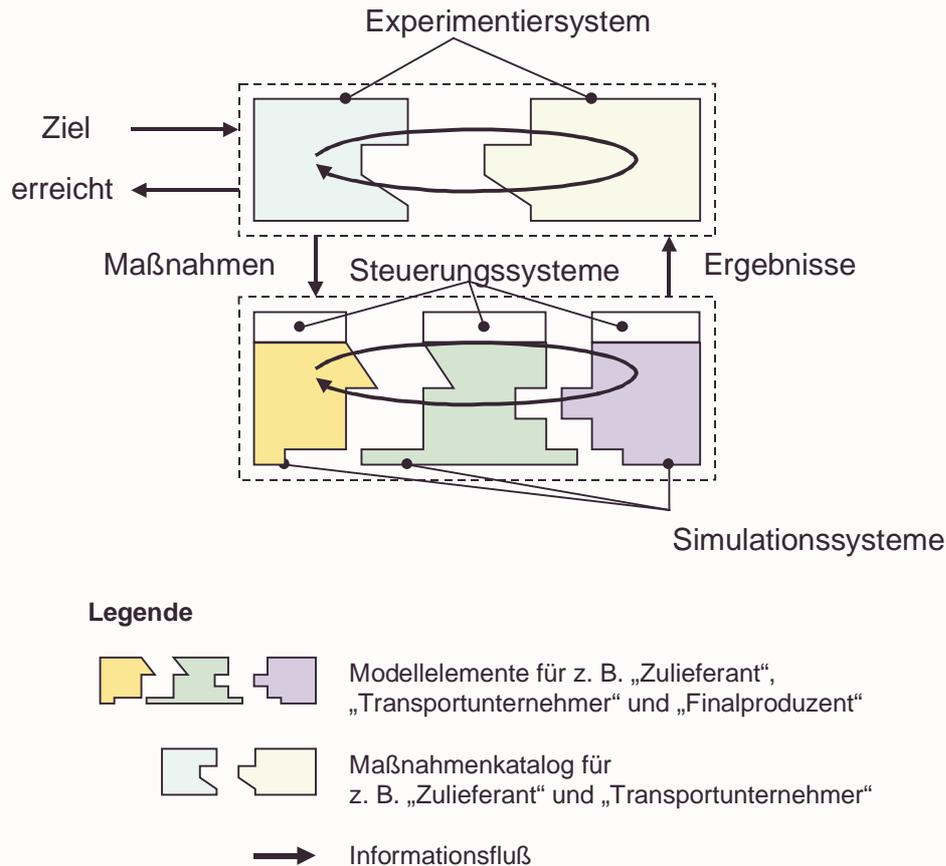


Bild 36: Verteilte Simulationsanordnung

Materialfluß findet nicht wie bisher innerhalb eines Simulationssystems statt, sondern über dessen Grenzen hinaus. Das schließt ein, Material von einem Simulationssystem in ein anderes zu übergeben, wobei Menge und Zeit interaktiv festgelegt werden müssen.

In einer verteilten Simulationsanordnung sollte es darüber hinaus möglich sein, daß interaktiv eine Einigung über die zu untersuchenden Maßnahmen erfolgt, Simulationssysteme auf anderen Rechnern gestartet und initialisiert werden, sowie die Ergebnisdaten aus den verschiedenen Simulationssystemen geholt werden können. Diese Aufgaben realisiert ein Vermittlungsdienst. Dieser würde es dem Experimentiersystem beispielsweise erlauben, Simulationssysteme über einen eindeutigen Namen zu referenzieren und selbständig auf anderen Rechnersystemen zu starten. Der daraus resultierende Vorteil ist, daß die Rechnerleistung, die zur Ausführung von Simulationen benötigt wird, auf verschiedene Rechner verteilt werden kann. Die aufgeführten Anforderungen bilden die Grundlage zur Bewertung der Kommunikationssysteme.

Unter den Kommunikationssystemen zeichnet sich die HLA in der Implementierung RTI 1.3 aus /21/. Sie bietet einen Dienst zur zeitlichen Koordination der Simulationssysteme an. Es ist zur Zeit die einzige Implementierung von Kommunikationssystemen, die auf den Internet-Protokollen aufsetzt und diese Voraussetzungen erfüllt, Simulationswerkzeuge zu koppeln. HLA in der Implementierung RTI 1.3 bietet jedoch keinen Vermittlungsdienst an. CORBA

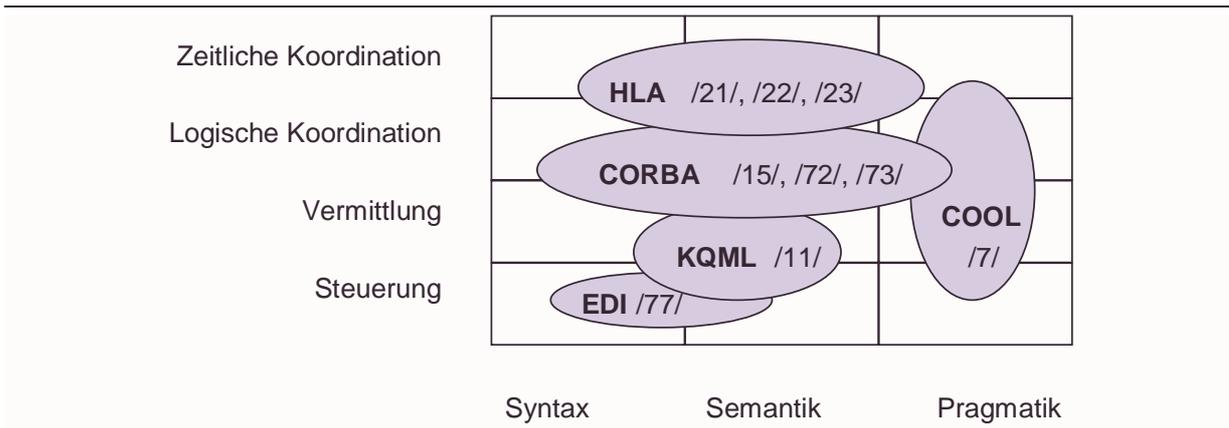


Bild 37: Übersicht der Bewertung

hingegen implementiert eine globale Adressverwaltung, um Objekte eindeutig über einen Namen zu referenzieren und zu starten.

Die Steuerung der Materialversorgung zwischen den Simulationssystemen setzt den Austausch von auftragsabhängigen Daten, wie z. B. Art, Menge oder Termine, sowie produktionsabhängiger Daten, wie z. B. Auslastungen bestimmter Maschinen, voraus. In Verbänden am weitesten verbreitet sind die EDI Verfahren zur Auftragsvergabe und zum Lieferabruf zwischen Unternehmen. Diese basieren in der Regel auf Internet Protokollen und definieren eine ausreichende Syntax und Semantik, um über ein Kommunikationssystem Aufträge vergeben zu können. Allerdings stehen keine Möglichkeiten zur Verfügung, weitere Dialoge zur Auftragsvergabe zu spezifizieren. Beispielsweise soll ein Auftrag von einem Simulationssystem an eines von drei alternativen Simulationssystemen weitergegeben werden. Für die dezentrale Auswahl eines Simulationssystems müssen also Dialoge definiert werden können, mit denen sich die Simulationssysteme abstimmen. Agentensprachen bieten solche Möglichkeiten. Ein Beispiel ist die Coordination Language (COOL).

CORBA oder HLA können zwar genutzt werden, um die einzelnen Ereignisse weiterzuleiten, eine Möglichkeit, Dialoge zur Steuerung der Materialversorgung zu definieren, gibt es jedoch nicht. Eine weitere Unterstützung dieser Dialoge bietet die KQML, die Sprechakttypen, wie z. B. *tell* oder *ask*, definiert. Bild 37 gibt eine Übersicht der Bewertung wider. Es wurden hier, wie beschrieben, die Aufgaben zeitliche und logische Koordination, Vermittlung und Steuerung der Einteilung in Syntax, Semantik und Pragmatik gegenübergestellt.

Im folgenden soll ein nachrichtenbasiertes Konzept entworfen werden, daß HLA und COOL integriert. Dabei liegen die zeitliche und logische Koordination der Simulationssysteme in der Hand des Kommunikationssystems HLA. Für die Steuerung der Materialversorgung werden Dialoge in COOL definiert und über HLA realisiert. EDI und KQML sollen dabei Hinweise für geeignete Sprechakttypen in Materialversorgung geben.

Damit der volle Nutzen für die Simulation der Materialversorgung erschlossen wird, muß eine geeignete Schnittstelle zwischen Kommunikations- und Simulationssystem konzipiert werden. So erhält das Simulationssystem, ebenso wie das Experimentiersystem, ein Kommunikationsmodul über das es alle notwendigen Dialoge mit anderen Simulations- und Experimentiersystemen abwickeln kann. Die Erstellung und Pflege der Modelle können auf diese Weise dezentral durchgeführt werden und die Simulation aus einzelnen Simulationsmodellen aufgebaut werden.

Dem Experimentiersystem fallen Aufgaben wie z. B. die Ergebnisanalyse und -darstellung aber auch die Auswahl der zu koppelnden Simulationssysteme zu. Weitere Aufgaben sind, sich über die Zielsetzung zu einigen und damit auch die Experimente festzulegen. Für die Einigung der Partner auf die durchzuführenden Experimente und das Zusammenstellen mehrerer Simulationsmodelle sind noch keine Entsprechungen in gängigen Simulationssystemen für die Produktion zu finden. Hierfür sind Nachrichtentypen zu entwerfen und über das Kommunikationsmodul auszutauschen.

Folgende Aufgaben sind durchzuführen:

- Für die Entwicklung eines Kommunikationsmoduls für Simulations- und Experimentiersysteme ist es erforderlich, Standards für den Nachrichtenaustausch zu definieren und ein Schnittstellenmodell zur Verfügung zu stellen, das alle zur Kommunikation relevanten Daten enthält. Dafür werden im Abschnitt 5.1 die Subsysteme in der Materialversorgung identifiziert und in den Abschnitten 5.2 und 5.3 die Nachrichten, die zwischen den Subsystemen ausgetauscht werden, klassifiziert. Regeln für den Nachrichtenaustausch werden in Abschnitt 5.4 definiert.
- Die Steuerung der Materialversorgung erfolgt dezentral. Dafür erfolgt ein Entwurf der Dialoge für Verhandlungen zwischen den Simulationssystemen. Verhandlungen setzen voraus, daß eine Bewertung des Verhandlungsgegenstandes, wie Aufträge und Ressourcen, möglich ist. Hierfür wird ein Bewertungsschema in Abschnitten 5.2.4 entworfen.

5 Konzeption einer verteilten Simulationsanordnung

5.1 Nachrichtenbasierter Ansatz

Zur Simulationsanordnung gehören Simulations- und Experimentiersysteme. Im folgenden wird eine Standardsimulationsanordnung für den Materialversorgungsprozeß entworfen, deren Bestandteile als Subsysteme bezeichnet werden. Eine Grundvoraussetzung ist die Integration vorhandener Simulationsmodelle, die an den Standorten der an der Materialversorgung beteiligten Partner zur Verfügung stehen. Daraus ergibt sich eine Aufteilung der Simulationsanordnung mit den einzelnen Subsystemen, wie in Bild 38 dargestellt. Das Beispiel aus Kapitel 2 dient zur Veranschaulichung. Lager, Transport, Fertigung und Montage finden sich als eigenständige Simulationssysteme in diesem Ansatz wieder. Su_1 bis Su_n haben Hochregallager und bereits simulierte Verpackungs- und Fertigungslinien und die beiden Finalmontagen As_1 und As_m haben ihre Montagelinien abgebildet. Sogar für die Abbildung des Streckennetzes stehen bereits vorhandene Modelle zur Verfügung /88/. So werden beispielsweise Verkehrssimulationen durchgeführt, um Aussagen über Baumaßnahmen im Vorfeld zu erhalten.

Hier wird ein verteilter, nachrichtenbasierter Ansatz vorgestellt. In einer verteilten Simulationsanordnung sollen sich die einzelnen Subsysteme durch Nachrichten gegenseitig so unterrichten, daß der Materialversorgungsprozeß als Ganzes simuliert wird. In Bild 39 sind die Kommunikationsverbindungen eingetragen. Es wird in Kommunikation zwischen Experimentiersystemen, zwischen Experimentier- und Simulationssystem sowie zwischen den

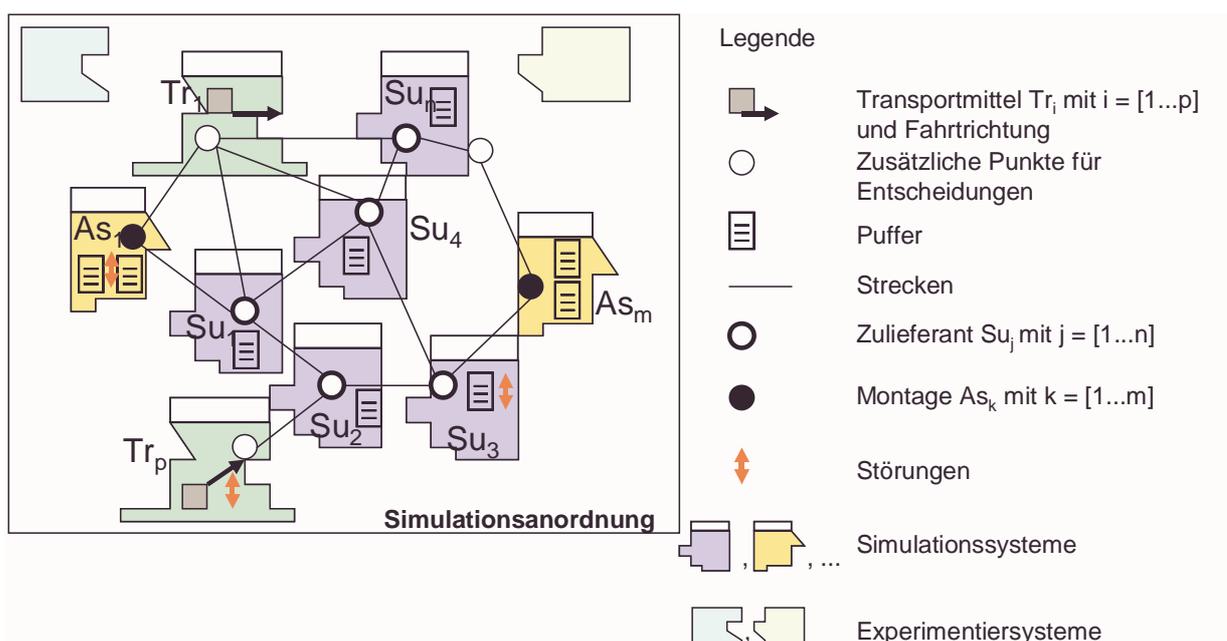


Bild 38: Simulationsanordnung eines Materialversorgungsprozesses

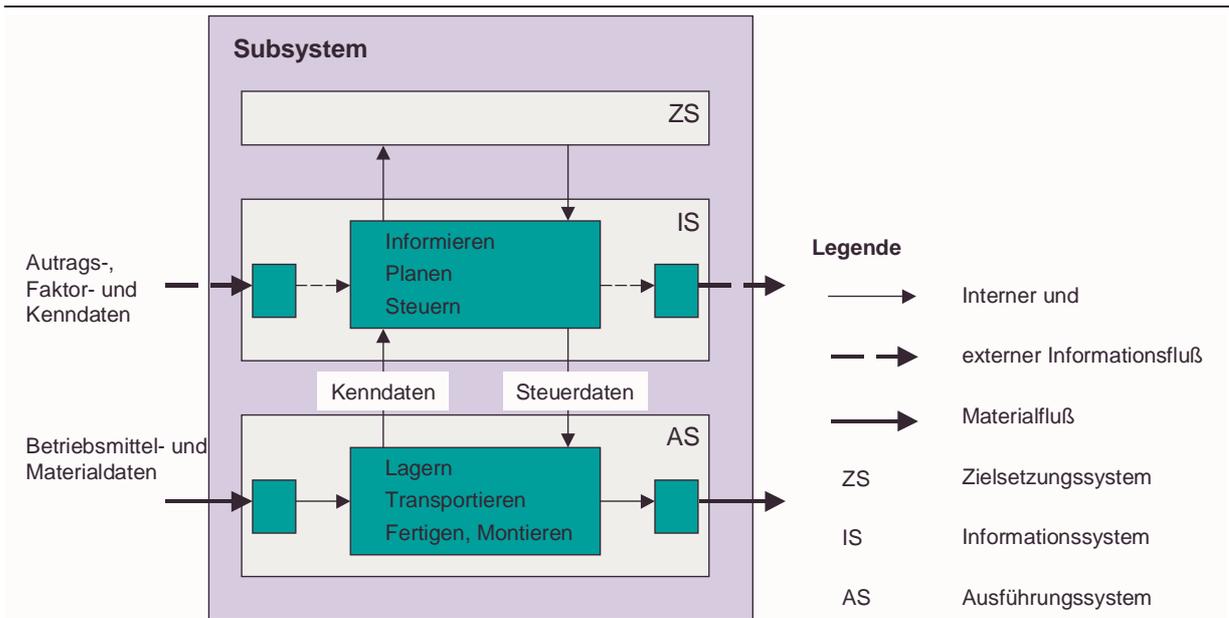


Bild 40: Allgemeines Subsystem

Das Informationssystem verarbeitet Auftrags-, Faktor-, Kenndaten. So verändert sich während der Simulation beispielsweise der Bestand an Material im Simulationssystem „Zulieferant“. Diese Veränderungen werden durch das Informationssystem zwischen den Subsystemen über Nachrichten ausgetauscht. Aufgrund dieser Informationen werden Steuerungsdaten generiert und zum Ausführungssystem weitergegeben. Im Informationssystem werden die Aktivitäten Informieren, Planen und Steuern durchgeführt.

Die Betrachtung des dynamischen Materialversorgungsprozesses erfordert jedoch zusätzliche Mechanismen, die eine Steuerung des Materialflusses zwischen den Subsystemen in Abhängigkeit der Situation ermöglichen. Im Kapitel 2 wird von einer dynamischen Rekonfiguration der Partner gesprochen, wenn Ressourcen wie z. B. Transportmittel neu Aufträgen zugeteilt werden. Im Materialversorgungsprozeß erteilt der Finalproduzent Aufträge an die Zulieferanten und der Zulieferant an den Transportunternehmer. Aus Sicht der Steuerung lassen sich Simulationssysteme in drei Grundtypen von Subsystemen einteilen:

- Verbraucher sind Simulationssysteme, die Ressourcen benötigen. Ein Verbraucher hat die Eigenschaft, eine oder mehrere Ressourcen für eine bestimmte Zeit zu belegen. Im Versorgungsprozeß kann der Zulieferant sowohl eine Ressource für den Finalproduzenten sein, die Material bereitstellt, als auch ein Verbraucher, der Transportmittel zur Materialversorgung benötigt.
- Ressourcen stehen für Simulationssysteme, die Ressourcen anbieten. Zu den Ressourcen zählen Material, Transport-, Lager-, Fertigungs- bzw. Montagesysteme. Hierfür besitzen sie die Fähigkeit, mit den Verbrauchern Verhandlungen durchzuführen. Bei-

spielsweise kann ein Lagersystem für die Versorgung der Montage die Ressource Material zur Verfügung stellen.

- Broker vermitteln Ressourcen oder Verbraucher. Ein Broker hat dabei den Überblick dadurch, daß sich Ressourcen oder Verbraucher bei ihm anmelden. Wenn beispielsweise ein LKW an einen Transportauftrag kommen möchte, wendet er sich an einen Broker.

Diese Grundtypen können für den Materialversorgungsprozeß frei kombiniert werden. Beispielsweise ist das Simulationssystem „Zulieferant“ sowohl ein Verbraucher in dem Sinne, daß es Aufträge an das Simulationssystem „Transportunternehmer“ weitergibt, als auch eine Ressource, da es Aufträge des Simulationssystems „Finalproduzent“ erhält.

Des weiteren gibt es einen Grundtyp für Experimentiersysteme:

- Beobachter geben Auskunft über den Wirkungsgrad einer Gruppe von Ressourcen oder Verbrauchern. Für die Simulation stellen sie die Subsysteme dar, mit denen eine Analyse durchgeführt bzw. Experimente geplant werden können. Sie benötigen nur eine Kopplung auf Informationsebene.

Aus diesen Subsystemen können Ketten und Netze gebildet werden. Verbraucher suchen Ressourcen über den Broker und treten dann direkt in die Verhandlung ein. Ist ein Vertrag zustande gekommen, wird der Verbraucher über den Fortschritt informiert. Über den Broker können weitere Komponenten vermittelt werden. Ressourcen geben Steuerungsbefehle an Simulationssysteme weiter. Der Beobachter erhält Informationen über die Kenngrößen in diesem System, um Auswertungen durchzuführen. Er kann Veränderungen in der Steuerung herbeiführen und so das System verbessern.

5.2 Simulationssysteme – Nachrichtenklassen

5.2.1 Auftragsdaten

In der Regel wird ein Auftrag vom Finalproduzenten an den Zulieferanten und vom Zulieferanten an den Transportunternehmer erteilt. Da Simulationssysteme stellvertretend für die Partner stehen, schickt das Simulationssystem „Finalproduzent“ einen Auftrag an das Simulationssystem „Zulieferant“ und das Simulationssystem „Zulieferant“ an das Simulationssystem „Transport“. Hinter diesen Systemen stehen die jeweiligen Simulationsmodelle für Lager, Transport, Fertigung und Montage. Zur Bereitstellung des benötigten Materials beim Finalproduzenten geht also ein Auftrag an einen Zulieferanten, der den Bedarf in der Montage durch eine Materialversorgung decken kann. Um einen Bedarf mitzuteilen, wird die Nachricht Auftrag eingeführt.

Tabelle 1 zeigt die Struktur der Nachricht für einen Auftrag. Neben der eindeutigen Bezeichnung für das zu liefernde Material sind Mengenangaben und Absender sowie Adressat zu benennen. Jedes Simulationssystem hat einen eindeutigen Namen, der als Adressat oder Absender ausreicht. Für notwendige technische Prüfungen sind Gewichts- und Volumenangaben optional. Des weiteren ermöglicht ein Termin, die Dringlichkeit des Auftrags beim Zulieferanten zu bewerten. Subsysteme der verteilten Simulation senden Aufträge im Informationssystem.

Nachrichtentyp	Beispiel
<i>(Auftrag</i> : <i>Id</i> <Name> : <i>Typ</i> <Name> : <i>Menge</i> <Stückzahl> : <i>Liefertermin</i> <Termin> : <i>Genauigkeit</i> <Zeit> : <i>Gewicht</i> <Gewichtmaß> : <i>Volumen</i> <Maß> : <i>Absender</i> <Name> : <i>Adresse</i> <Name>)	<i>(Auftrag</i> : <i>Id</i> xyz.Getriebe : <i>Typ</i> Getriebe : <i>Menge</i> 20 : <i>Termin</i> 9.4.2000, 12:00 : <i>Genauigkeit</i> 2 : <i>Gewicht</i> ? : <i>Volumen</i> ? : <i>Absender</i> s_Montage.Materialpuffer2 : <i>Adresse</i> s_Lager)

Tabelle 1: Nachricht Auftrag

5.2.2 Material- und Betriebsmitteldaten

Die Antwort auf einen Auftrag erfolgt im Ausführungssystem durch die Nachricht Material. Durch diese Nachricht soll der Materialtransport vom Zulieferanten zum Finalproduzenten beschrieben werden. Das Simulationssystem „Zulieferant“ schickt diese Nachricht also zum Simulationssystem „Transport“ und das Simulationssystem „Transport“ zum Simulationssystem „Finalproduzent“.

Da dieser Nachricht ein Auftrag vorausgegangen ist, muß der Empfänger die Voraussetzungen zunächst erfüllen. Das Simulationssystem „Zulieferant“ muß Material bereitstellen, entweder aus einem Lager oder der Produktion und das Simulationssystem „Transport“ muß ein Transportmittel zum Simulationssystem „Zulieferant“ schicken. Erst wenn diese Bedingungen erfüllt sind, erhält das Simulationssystem „Transport“ bzw. „Finalproduzent“ das Material. Deshalb erhält die Nachricht Material neben den Einträgen des Nachrichten-

typs „Auftrag“ weitere Einträge für die Bezeichnung des Transportmittels und des Ortes. Tabelle 2 zeigt die Nachricht Material.

Nachrichtentyp	Beispiel
<i>(Material</i> : <i>Id</i> <Name> : <i>Typ</i> <Name> : <i>Menge</i> <Stückzahl> : <i>Termin</i> <Zeit> : <i>Gewicht</i> <Gewichtmaß> : <i>Volumen</i> <Maß> : <i>Ort</i> <Position> : <i>Transport</i> <Name> : <i>Absender</i> <Name> : <i>Adresse</i> <Name>)	<i>(Material</i> : <i>Id</i> xyz.Getriebe : <i>Typ</i> Getriebe : <i>Menge</i> 20 : <i>Termin</i> 9.4.200, 12:00 : <i>Gewicht</i> ? : <i>Volumen</i> ? : <i>Ort</i> s_Lager.Ausgang1 : <i>Transport</i> s_Transport.LKW1 : <i>Absender</i> s_Lager : <i>Adresse</i> s_Montage)

Tabelle 2: Nachricht Material

Neben der Nachricht „Material“ können Transportmittel und -hilfsmittel zwischen den Simulationssystemen auf der Ausführungsebene wechseln. Notwendig wird diese Nachrichtenklasse, wenn mehr als ein Simulationssystem den Transport simuliert oder ein Transportmittel zum Be- oder Entladen vom Simulationssystem „Transport“ in das Simulationssystem „Zulieferant“ oder „Finalproduzent“ wechselt. Beispielsweise fahren Lkw zum Be- oder Entladen an eine Ladezone heran. Gehört die Ladezone bereits Simulationssystem „Finalproduzent“ schickt in diesem Fall das Simulationssystem die Nachricht „Transportmittel“ das an das Simulationssystem „Finalproduzent“. Weitere Inhalte der Nachricht „Transportmittel“ sind Geschwindigkeit und Kapazität (Tabelle 4).

5.2.3 Kenndaten

5.2.3.1 Lager

Neben den Nachrichten, wie Auftrag, Material und Transportmittel, die zwischen den Simulationssystemen ausgetauscht werden, gibt es einen Nachrichtentyp „Kenndaten“, mit dessen Hilfe sich die Simulationssysteme gegenseitig über die aktuelle Situation in der Produktion informieren. Dabei bezieht sich eine Kenngröße auf ein charakteristisches Merkmal des Finalproduzenten, Zulieferanten oder Transportunternehmers. Dieses Merkmal hängt wiederum von den eingesetzten Systemen, wie Lager, Transport, Fertigung oder Montage ab. So ist beispielsweise die Einlagerungszeit eine Kenngröße des Lagers. Der Kennwert

Nachrichtentyp	Beispiel
<i>(Transportmittel</i> : <i>Id</i> <Name> : <i>Type</i> <Name> : <i>Geschwindigkeit</i> <Maß> : <i>Kapazität</i> <Mengenmaß> : <i>Absender</i> <Name> : <i>Adresse</i> <Name> <i>)</i>	<i>(Transportmittel</i> : <i>Id</i> xyz.Lkw : <i>Type</i> Lkw : <i>Geschwindigkeit</i> 80 : <i>Kapazität</i> 100 : <i>Absender</i> s_Transport1 : <i>Adresse</i> s_Transport2 <i>)</i>

Tabelle 4: Nachricht Betriebsmittel

So ist beispielsweise die Einlagerungszeit eine Kenngröße des Lagers. Der Kennwert bezeichnet die Ausprägung des Merkmals bzw. der Kenngröße.

Tabelle 3 zeigt die Struktur der Nachricht Kenndaten. Neben Kenngröße und -wert ist anzugeben, worauf sich die Kenngröße bezieht, sowie dessen Absender und Adressat.

Lager sind unerlässlicher Bestandteil eines Versorgungsprozesses. Lager dienen zum Ausgleich von Schwankungen. Wenn Material lagert, dann ist dadurch Kapital gebunden, was betriebswirtschaftlich gesehen zu Kosten führt. So geht das Bestreben dahin, mit möglichst kleinen Lagern auszukommen.

Ein Simulationsmodell eines Lagers besteht mindestens aus einer Warteschlange, in der sich das zu lagernde Material einreihet. Die zur Verfügung stehende Fläche determiniert die Menge an Lagergütern, die eingelagert werden können. Durch Aufteilung in verschiedene Lagerbereiche und das Hinzufügen von Transportsystemen entstehen größerer Lagermodelle, wie z. B. Hochregallager. Ein solches Lager ist aufgeteilt in verschiedene Bereiche, das Regelbediengerät und die Ein- bzw. Auslagerungsstationen.

Grundsätzlich erfährt einzulagerndes Material keine Änderung der Beschaffenheit und kei-

Nachrichtentyp	Beispiel
<i>(Kenndaten</i> : <i>Kenngröße</i> <Name> : <i>Referenz</i> <Name> : <i>Wert</i> <Zahl> : <i>Absender</i> <Name> : <i>Adresse</i> <Name> <i>)</i>	<i>(Kenndaten</i> : <i>Kenngröße</i> Bestand : <i>Referenz</i> xyzGetriebe : <i>Wert</i> 100 : <i>Absender</i> s_Montage.Materialpuffer2 : <i>Adresse</i> ? <i>)</i>

Tabelle 3: Nachricht Kenndaten

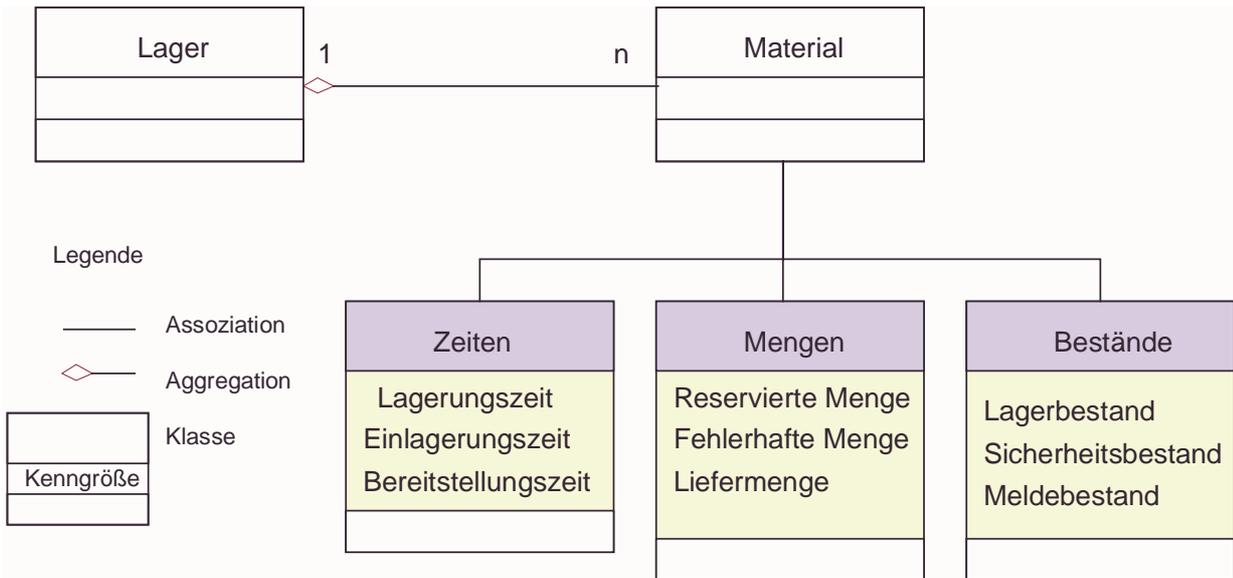


Bild 41: Kenndaten des Lagers

ne Ortsänderung, abgesehen von einer internen Änderung des Ortes für die Ein- bzw. Auslagerung. Die Nachricht Material von einem anderen Subsystem im Ausführungssystem ist Auslöser der Schritte, die zur Einlagerung durchgeführt werden. Während dieser Schritte werden die Kenngrößen des Lagers verändert.

Simulationssysteme, die ein Lager enthalten, senden Nachrichten (Bild 41) über die Kenngrößen Bestand, Lagerungszeit sowie Zu- bzw. Abgangsmenge /48/. Diese sollen auch für die einzelnen Lagerobjekte differenziert ermittelt werden können. Sinkt beispielsweise der Bestand eines Lagergutes häufig auf Null, sind die Menge und Häufigkeit zur Anschaffung dieses Lagergutes zu erhöhen, um die Produktion nicht zu beeinträchtigen. Die Lagerungszeit ist die Verweilzeit eines Lagergutes im Lager und soll so kurz wie möglich gehalten werden, um die Durchlaufzeit und Umlaufkapitalbindung zu reduzieren. Die Häufigkeit der Lagerbewegung ist die Anzahl der Ein- und Auslagerung von Material innerhalb eines bestimmten Betrachtungszeitraumes

5.2.3.2 Transport

Transportsysteme ändern die Raum- und Zeitkoordinaten eines Transportobjektes sowie des Transportmittels bzw. -hilfsmittel. Hinsichtlich des Transportobjektes ist ein Transportsystem ein Empfänger und Sender von Nachrichten analog dem Lagersystem. So kann der Ein- bzw. Abgang von Transportobjekten ebenso wie der Bestand, Zu- und Abgangsmenge und Verweilzeit betrachtet werden. Für die Transportmittel werden weitere Kenngrößen benötigt.

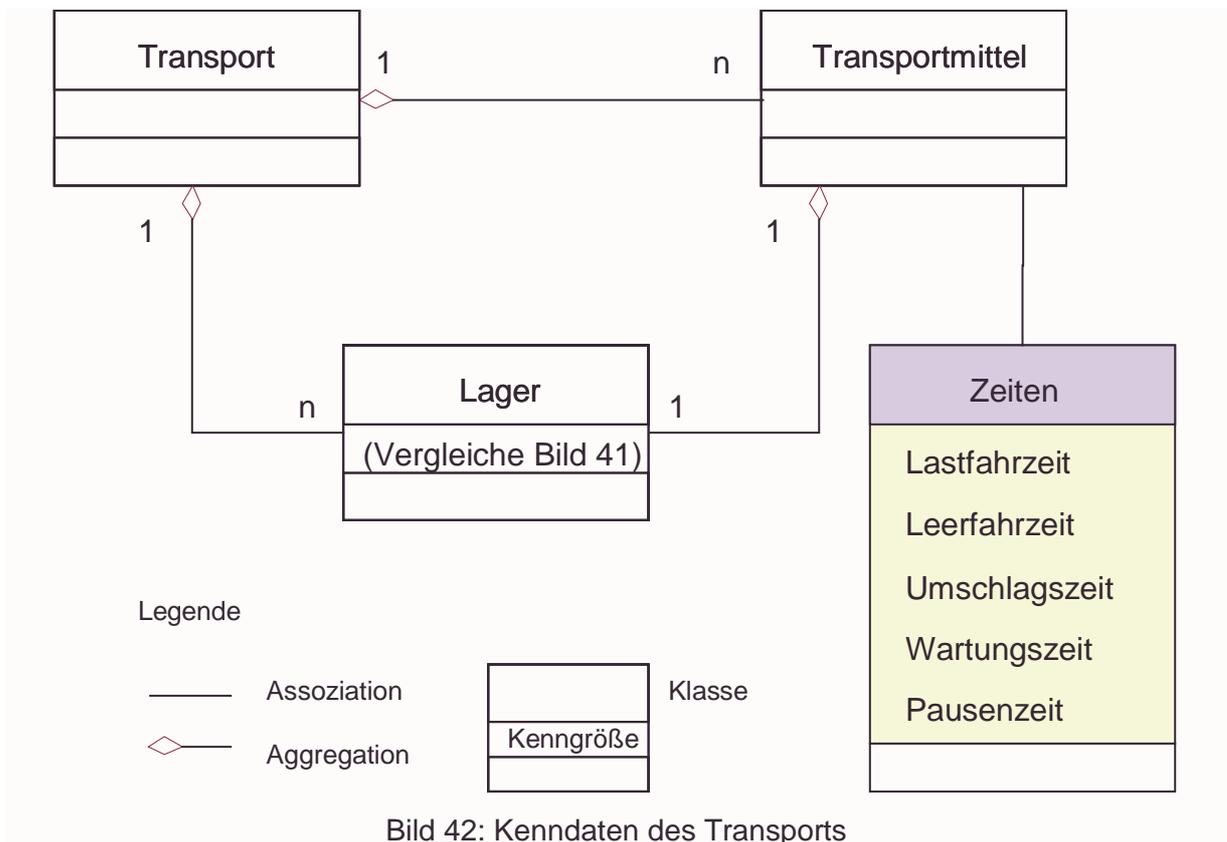
Bild 42 zeigt die Kenngrößen des Transportmittels. Zeitbezogen werden Lastfahrtanteil, Leerfahrtanteil und Umschlagzeitanteil untergliedert. Während der Lastfahrt werden Objek-

te transportiert. Die Leerfahrt ist die Fahrt eines Transportmittels vom aktuellen Standpunkt zum Ausgangspunkt eines Transportauftrags. Unter Umschlag ist das Be- und Entladen sowie die Umsetzung zwischen Transportmitteln zu verstehen /24/.

Die Transportzeiten vom Zulieferant zum Finalproduzenten können aus den Kenngrößen des Materials gemessen werden und sind ein Gütekriterium für den Transport. Anhand dieser Kenngröße kann beispielsweise die Steuerungsstrategie eines Transportsystems optimiert werden. Ebenfalls für die Steuerungsstrategie relevant sind die Wartezeiten und Umwege der Transportmittel wegen Verkehrskonflikten.

5.2.3.3 Fertigung und Montage

Fertigungs- und Montagesysteme setzen sich wiederum aus den vorher beschriebenen Systemen zusammen und erweitern diese um Betriebsmittel. Betriebsmittel in der Montage dienen zum Zusammenbau von Produkten aus Einzelteilen und Baugruppen. In der Fertigung werden Betriebsmittel dazu genutzt, Fertigungsobjekte in ihrer Beschaffenheit durch die verschiedenen Fertigungsprozesse wie z. B. Fräsen oder Drehen zu wandeln. Aus Sicht der Materialversorgung unterscheiden sich Fertigung und Montage dahingehend, daß in der Montage eine Station aus mehreren Vorpuffern für unterschiedliches Material besteht.



Bei den Kenngrößen handelt es sich im wesentlichen um Angaben über die unterschiedlichen Zeitanteile für die Betriebs-, Pausen-, Warte-, Wartung- und Rüstzeit. Hinzu kommen Angaben über den Bestand an Material der Station. Pufferbestand der Materialbereitstellung, den Bestand des Vor- und Nachpuffers lassen sich durch Kenngrößen des Lagers beschreiben, ebenso wie der Durchsatz in Stückzahlen der abgefertigten Produkte. Mit Hilfe dieser Kenngrößen lassen sich Steuerungsstrategien beeinflussen. Der Betriebszeitanteil und der Rüstzeitanteil können für die Produktvarianten differenziert ermittelt werden, um z. B. bei der Kostenträgerrechnung eine differenzierte Zuschlagskalkulation /42/ durchführen zu können.

Neben den Kenngrößen für die Fertigungs- und Montagemittel gibt es noch Kenngrößen für die Hilfsmittel, wie Werkzeuge und Vorrichtungen. Die relevanten zeitbezogenen Kenngrößen der Werkzeuge und Vorrichtungen gleichen denen der Betriebsmittel (Bild 43). Ein Transport kann erforderlich sein, wenn die Werkzeuge und Vorrichtungen nicht am Ort des Einsatzes bereitgehalten werden können, oder wenn diese von mehreren Stationen ge-

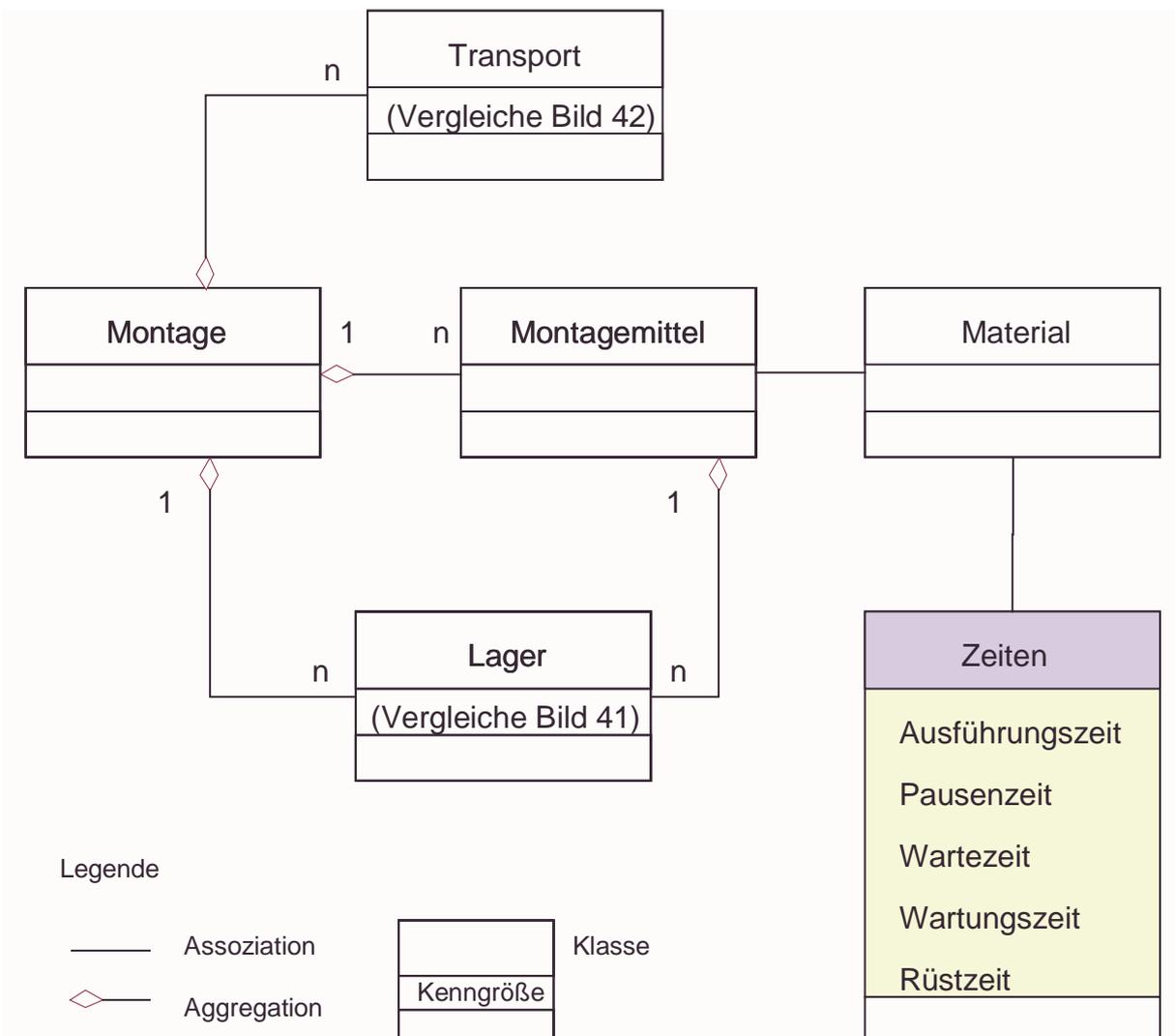


Bild 43: Kenndaten der Montage

meinsam genutzt werden. Dafür können Kenngrößen des Transportsystems herangezogen werden. So gibt die Wechselhäufigkeit der Werkzeuge und Vorrichtungen Hinweise darauf, welche Werkzeuge und Vorrichtungen möglichst nahe dem Einsatzort bereitgestellt werden sollen, wenn dort nicht alles bereitgehalten werden kann.

5.2.3.4 Auftrag

Um Simulationen auszuwerten, bieten Aufträge wichtige Kenngrößen, wie Liefer- und Bereitstelltermin, Menge und Durchlaufzeit (Bild 44). Die Durchlaufzeit gliedert sich in Ausführungszeiten, Rüstzeiten, Liegezeiten, Transportzeiten, Nacharbeitungszeiten /111/. Wichtige Informationen zur Bewertung der Aufträge lassen sich aus Liefer- und Bereitstelltermin im Vergleich zum geplanten Liefertermin und den Genauigkeitsanforderungen, die in den Auftragsdaten definiert sind, ableiten. Der Bereitstelltermin gibt den Zeitpunkt an, an dem der Auftrag erfüllt wurde. So kann beispielsweise dieser Zeitpunkt mit dem geplanten Bereitstelltermin Auskunft über die Güte der Materialversorgung geben (vgl. Kapitel 2.1).

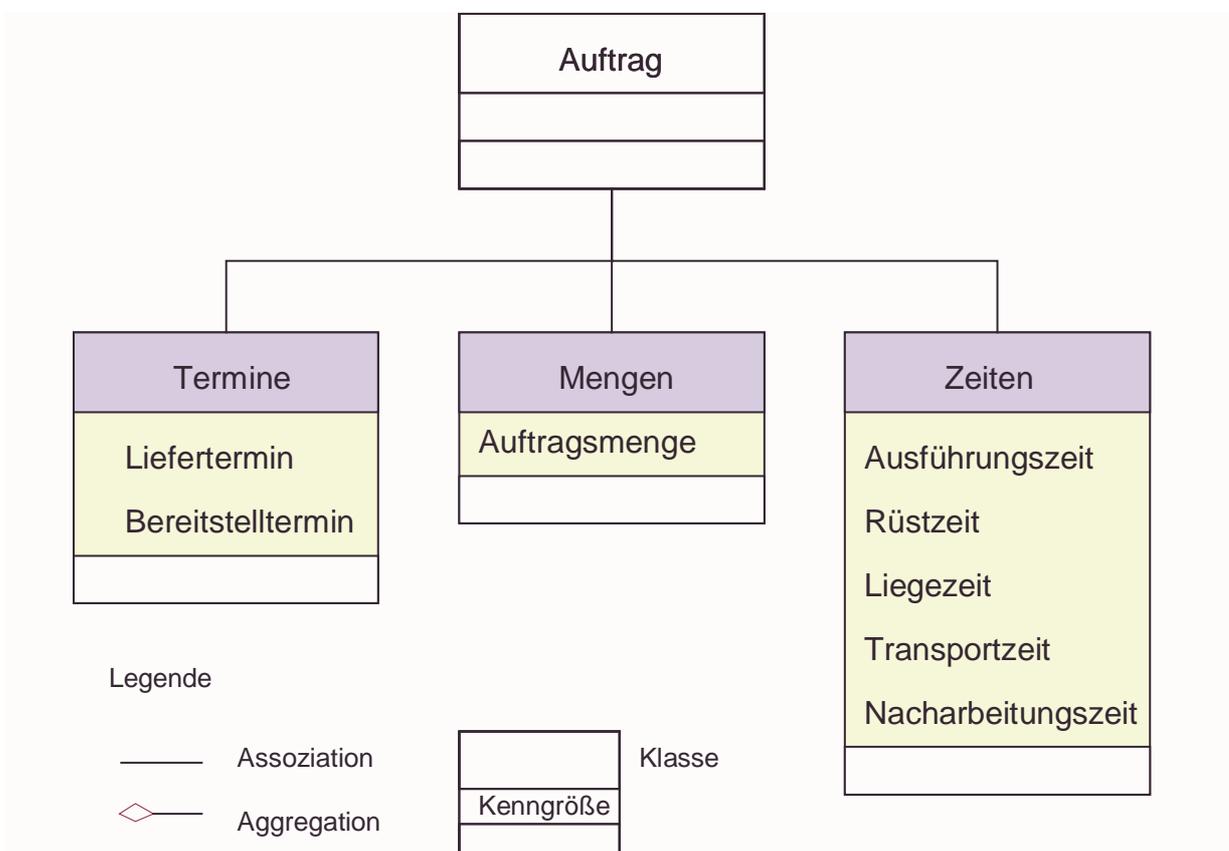


Bild 44: Kenndaten des Auftrags

5.2.4 Dynamische Rekonfiguration

5.2.4.1 Fuzzy-logische Regeln

Bei der bisherigen Betrachtung der Materialversorgung ist von einer Kette der Auftragsvergabe ausgegangen worden, bei der der Empfänger des Auftrags schon feststand. Der Finalproduzent vergibt einen Auftrag an den Zulieferanten, der wiederum vergibt einen Auftrag an den Transportunternehmer. So schickt das Simulationssystem „Finalproduzent“ einen Auftrag zum Simulationssystem „Zulieferant“ und so weiter. Allerdings können sich in einem Verbund Veränderungen ergeben, die eine andere Auftragsvergabe erfordern. Beispiele solcher Veränderungen sind in Kapitel 2 zu finden.

In der Materialversorgung sind gemäß Abschnitt 5.1 die Simulationssysteme des Finalproduzenten und des Zulieferanten Verbraucher, da sie Aufträge vergeben und so Ressourcen „verbrauchen“. Auf der anderen Seite stehen die Ressourcen, die Aufträge verarbeiten. Hierzu zählen die Simulationssysteme der Zulieferanten und Transportunternehmer. Aufgabe in der dynamischen Rekonfiguration einer Simulationsanordnung ist es, eine gute Zuteilung von Verbrauchern und Ressourcen in Abhängigkeit der veränderten Situation zu finden.

Verbraucher suchen für Aufträge Ressourcen und Ressourcen suchen Aufträge. Als Koordinationswerkzeug bei der Suche soll ein Verhandlungsschema dienen, das von Verbrauchern und Ressourcen ausgeführt wird. Um in den Verhandlungen den Wert eines Auftrags bzw. einer Ressource feststellen zu können, muß es möglich sein, Aufträge und Ressourcen nach ihrer Wichtigkeit zu bewerten. In die Bewertung sollen Erfahrungswerte und einfache Heuristiken, wie z. B. Prioritätsregeln, einfließen.

Hierfür haben sich fuzzy-logische Regeln bewährt:

1. Situationen sind intransparent, d.h. nicht alle Informationen stehen zur Verfügung. Das kann auch dadurch bedingt sein, daß eine Information fehlerhaft oder gar nicht übertragen wird.
2. Ressourcen und Verbraucher werten eine Situation mit Begriffen wie z. B. kritisch, wichtig oder unwichtig. Das entspricht dem menschlichen Vorgehen und verspricht somit, daß Bewertungen später nachvollzogen werden können. Erfahrungswerte können überprüft werden.

In einer Simulationsanordnung können Veränderungen der Situation durch die Nachricht Kenndaten von den Simulationssystemen bekannt gemacht werden. Für die Bewertung werden deshalb die Kenngrößen herangezogen. Das können beispielsweise für ein Transportmittel die Kenngrößen Betriebszeit oder Bestand sein. Diese Größen werden in Berei-

che eingeteilt, denen die sogenannten fuzzigen Bezeichnungen wie „viel“, „sehr viel“ oder auch „wenig“ zugeordnet werden.

Bild 45 zeigt eine übliche Einteilung eines Bereichs einer Größe, in der Fuzzy-Logik Variable genannt, in Dreiecke. Der Bestand und die Lastfahrzeit eines Transportmittels wurden hier in vier Dreiecke eingeteilt: zu wenig, wenig, gerade recht, zu viel. Der Bereich, der mit den Dreiecken abgedeckt wird, und die Größe der Dreiecke müssen sorgfältig ausgewählt werden. Je kleiner und enger die Dreiecke zusammen liegen, um so genauer ist die Beschreibung einer Situation.

Ein fuzzy-logisches System ist eine Menge von m Regeln. Die m Regeln haben die Form:

$$\text{„WENN } X = A_j, \text{ DANN } = B_j \text{“}.$$

Der WENN-Teil der Regeln mit $A_j \subset R^n$ und der DANN-Teil der Regeln mit $B_j \subset R^p$ haben eine Funktion $a_j : R^n \rightarrow [0,1]$ beziehungsweise $b_j : R^p \rightarrow [0,1]$, welche die Ausprägungen der Variable in Werte zwischen 0 und 1 überführt. Bild 45 [a] zeigt den Bestand x eines Transportmittels. Für die Ausprägung $x_1 = 2,5$ ergibt sich ein Wert für $a_1(x_1) = 0,8$. Der WENN-Teil der Regeln ist damit beschrieben. Der DANN-Teil der Regeln soll den Wert eines Auftrags oder einer Ressource in einer Situation beschreiben. Diese Werte bringen Verbraucher und Ressourcen bei der Vergabe von Aufträgen beziehungsweise Ressourcen mit ein. Eine Regel könnten wie folgt aussehen:

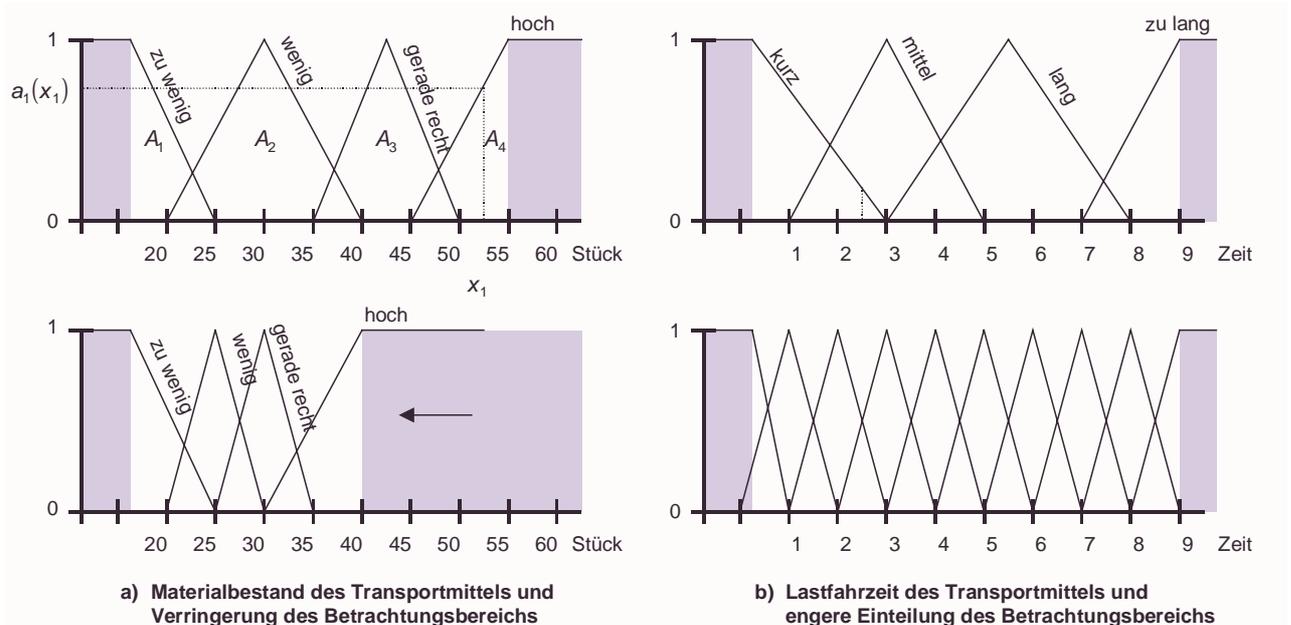


Bild 45: Unscharfe Einteilung der Ausprägungen der Variablen

Regel 4: „WENN der Materialbestand des Transportmittels 1 zu wenig,
DANN Wert des Transportmittels 1 sehr wichtig.“

Weitere Regeln lassen sich aus anderen Variablen ableiten, wie z. B. Liefer-, Bereitstelltermin für Komponente 1 oder Materialbestand im Montagsystem. Ausgangspunkt für das Aufstellen der Variablen sind die Kenngrößen. Auf diese Weise läßt sich für jeden Eingabevektor $x = (x_1, \dots, x_n) \in R^n$ ein Wert für Verbraucher und Ressourcen bestimmen. Diese Verhandlungswerte sind keine unscharfen Mengen, sondern konkrete Zahlen.

Jedes fuzzy-logische System funktioniert auf die gleiche Weise. Alle Regeln werden parallel angewandt /50/. Bild 47 zeigt eine additive Vorgehensweise. Jede Regel wird zu einem gewissen Grad $a_j(x)$ angewandt. So entstehen B'_1, B'_2 bis B'_n , die addiert werden, um B zu erhalten. Ein additives System (SAM) summiert die „gefeuerten“ DANN-Teile der Regeln B'_j /66/:

$$B(x) = \sum_{j=1}^m w_j B'_j = \sum_{j=1}^m w_j a_j(x) B_j. \quad (1)$$

Da in dem Beispiel aus Bild 46 nur eine Regel „feuert“, ist $B(x) = B'_4$ ein Dreieck, wobei eine zusätzliche Gewichtung w_j nicht vorgenommen wurde. „Feuern“ mehrere DANN-Teile bis zu einem gewissen Grad, dann erhält man eine Fläche aus addierten Dreiecken. Um aus dem System einen konkreten Wert zu erhalten, gibt es verschiedene Defuzzifizierungsmethoden. Beispiele sind die Maximum-Methode, die Mittelwert-Methode oder die Schwerpunktmethode /10/. Hiervon hat sich die Schwerpunktmethode bewährt /10/, /50/. Der Verhandlungswert der Ressource oder des Verbrauchers wird dann wie folgt berechnet:

$$V(x) = \text{Schwerpunkt} \left(\sum_{j=1}^m w_j a_j(x) B_j \right) \quad (2)$$

KOSKO zeigt in /66/, daß der Schwerpunkt der einzelnen Flächen verwendet werden kann,

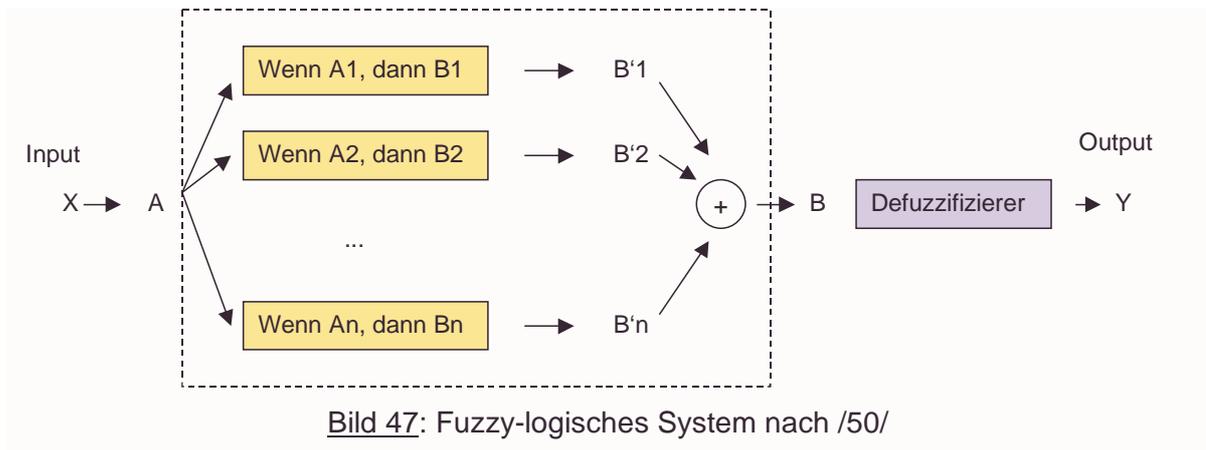


Bild 47: Fuzzy-logisches System nach /50/

wenn ein additives Modell zu Grunde liegt:

$$V(x) = \frac{\sum_{j=1}^m w_j a_j(x) V_j c_j}{\sum_{j=1}^m w_j a_j(x) V_j}, \quad (3)$$

wobei V_j die Fläche von B_j und c_j der Schwerpunkt dieser Fläche ist.

Bisher wurde nur eine Variable eingesetzt, beziehungsweise angedeutet, daß der Eingabevektor $x = (x_1, \dots, x_n) \in R^n$ ist. Auch fuzzy-logische Variablen lassen sich mit logischen Operatoren NOT (\neg), OR (\vee) und AND (\wedge) verknüpfen. Die NOT-Operation ist dann wie folgt definiert:

$$\neg a_j = 1 - a_j \quad (4)$$

Die Verknüpfung zweier fuzzy-logischer Variablen a_j und b_j errechnet sich wie folgt:

$$a_j \vee b_j = \text{MAX}(a_j, b_j) \quad (5)$$

$$a_j \wedge b_j = \text{MIN}(a_j, b_j) \quad (6)$$

So lassen sich weitere Regeln einführen der Form:

„WENN *der Materialbestand des Transportmittels 1 wenig* und nicht *Transportzeit zur Montage 2 kurz*, DANN *Wert des Transportmittels 1 unbedeutend*“

Die Variable *Materialbestand* wird auf diese Weise abgeschwächt, da der Wert des Transportmittels nur dann unbedeutend ist, solange die Variable *Transportzeit* zur Montage 2 nicht kurz ist. Bild 48 zeigt ein Beispiel mit einer weiteren Regel, die besagt, daß, wenn die Transportzeit zur Montage 2 mittel ist, dann ist der Wert des Transportmittels normal. Mit diesen beiden Angaben kann für die Situation $x^0 = (x_1^0, x_2^0)$ der konkrete Verhandlungswert berechnet werden. Dazu werden zunächst die WENN-Teile der Regeln aufgelöst und die Werte für $a_1 = 0,8$ und $a_2 = 0,7$ berechnet, wobei

$$a_2 = a_2^4(x_1^0) \wedge (\neg a_2^1(x_2^0)) = a_2^4(x_1^0) \wedge (1 - a_2^1(x_2^0)) \text{ nach (4)}$$

$$= \text{MIN}(a_2^4(x_1^0), (1 - a_2^1(x_2^0))) \text{ nach (5)}$$

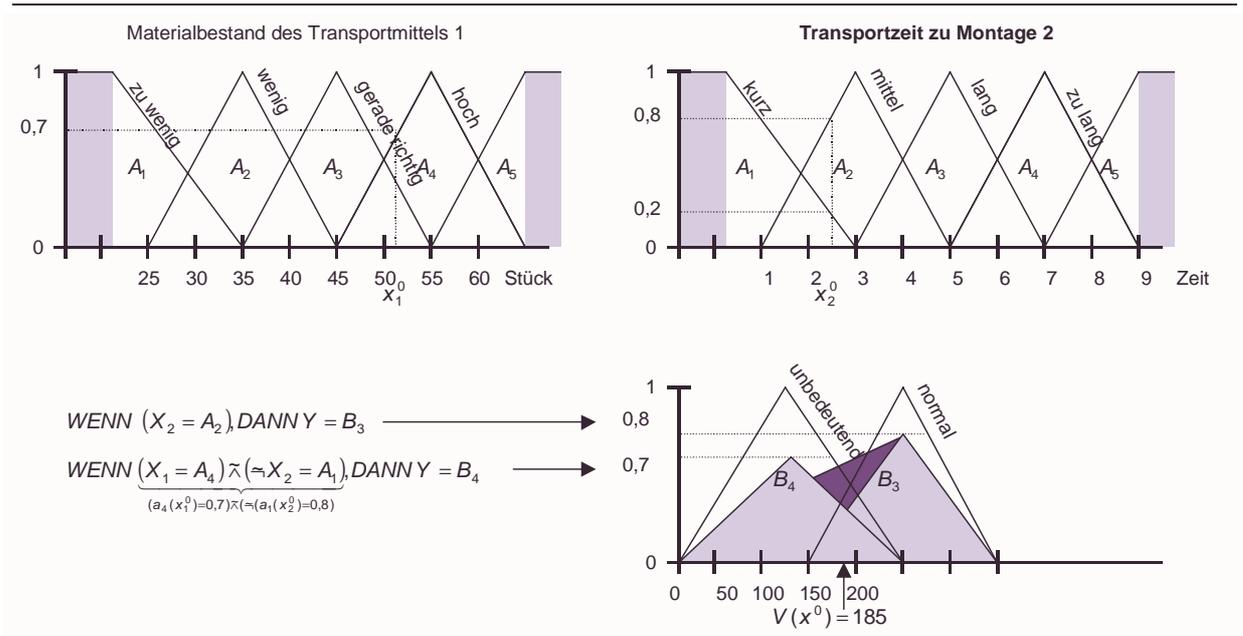


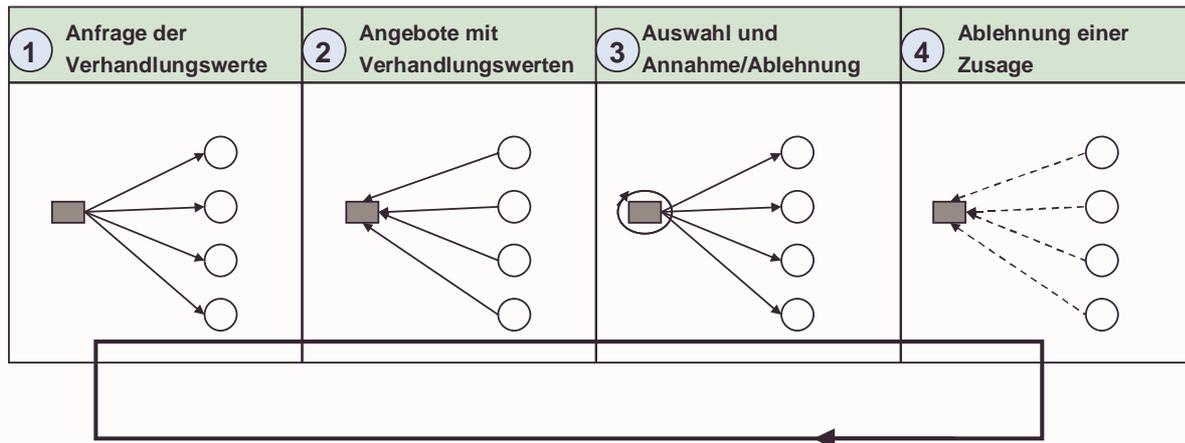
Bild 48: Beispiel zur Berechnung des Verhandlungswerts

ist. Da $a_2^4(x_1^0) = 0,7$ und $a_2^1(x_2^0) = 0,2$ ist, ist $a_2 = 0,7$. Damit steht der Grad fest, mit dem die DANN-Teile der Regel gefeuert werden. In Bild 48 ist die Ergebnisfläche für B abgebildet. Fläche und Schwerpunkt der einzelnen Dreiecke B3 und B4 werden berechnet und mit a_1 und a_2 in (3) eingesetzt. Daraus ergibt sich der Wert $V = 185$.

5.2.4.2 Verhandlungsschema

Als Koordinationswerkzeug in dezentralen Strukturen haben sich Verhandlungen bewährt. Verhandlungen zwischen Verbrauchern und Ressourcen sollen in vier Phasen durchgeführt werden. Bild 49 zeigt dieses Verhandlungsschema. Zwei grundsätzliche Positionen gibt es in diesem Schema. Den Anfragenden und den Bietenden. Beide Rollen können sowohl von Ressourcen als auch Verbrauchern eingenommen werden. Der Anfragende eröffnet die Verhandlung, indem er die Bietenden auffordert, mit einem Verhandlungswert teilzunehmen (Bild 49 [1]). Der Verhandlungswert wird über fuzzy-logische Regeln bestimmt und an den Anfragende weitergeleitet (Bild 49 [2]). In der nächsten Phase soll dem Anfragenden die Möglichkeit gegeben werden, zwischen mehreren Bietenden auszuwählen. Folgende Situation wäre denkbar. Der Lkw Tr_1 bittet in der ersten Phase die Aufträge an den Zulieferantenstandorten Su_1 bis Su_n um ihre Verhandlungswerte, welche die Aufträge aus den Variablen *Bestand in der Montage* und *Bereitstelltermin* bilden und weiterleiten. Die Kenndaten der Variablen werden über die Informationssysteme der Subsysteme ausgetauscht. Jetzt kann der Lkw die wichtigsten Aufträge auswählen.

In die Phase 3 (Bild 49 [3]) gehört auch die Mitteilung des Anfragenden an die Bietenden, ob diese angenommen oder abgelehnt wurden. Eine Ablehnung bedeutet für einen Auftrag,



- Legende**
- | | | | |
|----------|------------|----------|--------------------|
| Agenten: | | | |
| ■ | Anfragende | → | Nachricht |
| ○ | Bietende | - - - -> | Mögliche Nachricht |

Bild 49: Verhandlungsschema

daß dieser noch kein Transportmittel zur Beförderung gefunden hat. Mit der Annahme schickt der Anfragende, in dem Beispiel der Lkw, auch seinen spezifischen Verhandlungswert zum Auftrag. Dadurch kann jetzt der Auftrag entscheiden, ob er annimmt oder ablehnt (Bild 49 [4]). Analog den Phasen der Verhandlung werden neue Nachrichtentypen definiert: Anfrage, Angebot, Annahme und Ablehnung.

Durch diese Verfahrensweise kann eine Auswahl aus mehreren Anfragenden bzw. Ressourcen getroffen werden. Der Wert des Lkw kann beispielsweise aus den Kenngrößen *Bestand* und *Transportzeit bis zur Montage* berechnet werden. Entscheidungspunkte im Streckennetz dienen dazu, bestimmte Ressourcen/Auftragskombinationen festzulegen, die also nicht mehr aufgelöst werden können. Das bedeutet für den Auftragsagenten, daß er an keinen weiteren Verhandlungen teilnehmen darf. Des weiteren basiert dieses Verfahren darauf, daß Agenten ihre wahren Werte mitteilen.

5.2.5 Broker

Bisher ist davon ausgegangen worden, daß Anfragende die Adressen der Bietenden kennen und umgekehrt. Da zum Beispiel Aufträge nur temporär, d.h. für eine bestimmte Zeit, im Modellnetz nach Ressourcen suchen, müssen Ressourcen darüber informiert werden, welche Aufträge im Netz sind. Dafür wird die Rolle des Brokers eingeführt. Bild 50 zeigt ein solches Subsystem in der Simulationsanordnung.

Der Broker steht in diesem Fall für das Transportunternehmen im Verbund. Die Aufträge sind die Anfragenden und die Lkw die Bietenden. Zunächst wird also eine Anfrage an den

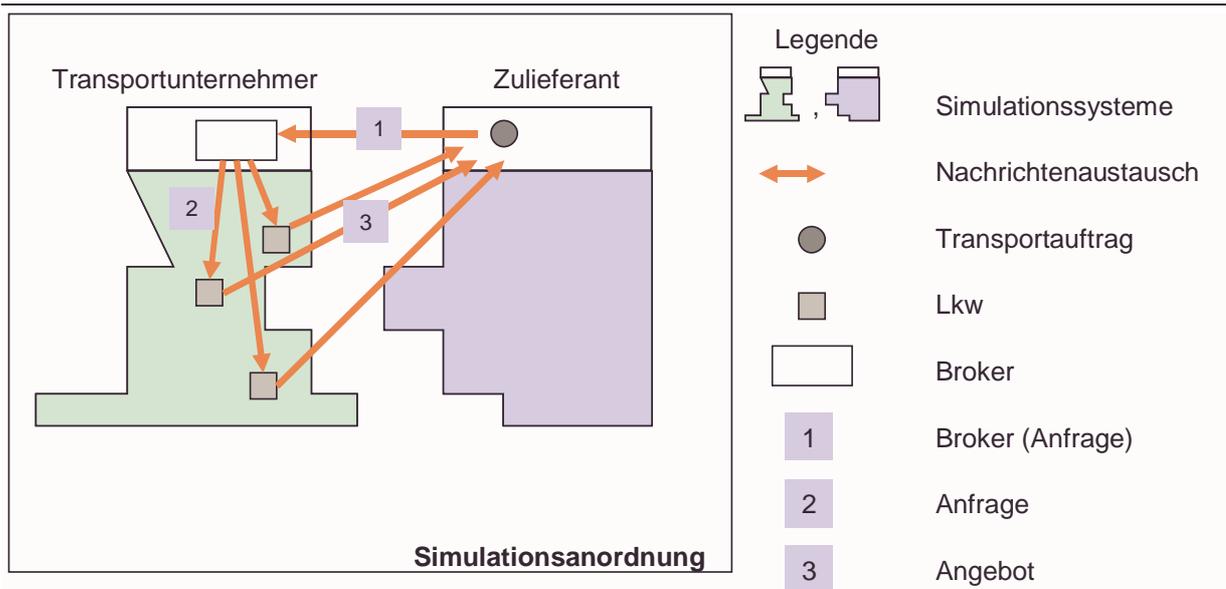


Bild 50: Broker Transportunternehmen

Broker geschickt, welcher im Gegenzug die Lkw auffordert an der Verhandlung teilzunehmen. Der Broker schaltet sich im Verhandlungsschema zwischen den Anfragenden und den Bietenden in der ersten Phase der Verhandlung. Es folgen die weiteren Phasen der Verhandlung ohne den Broker.

5.3 Experimentiersysteme - Nachrichten vom Beobachter

5.3.1 Versuchsplanung

Die Aufgabe des Experimentiersystems in einer Simulationsanordnung ist zum einen durch eine geschickte Versuchsplanung, schnell eine Parameterkonstellation mit guten Ergebnissen zu finden, zum anderen sicherzustellen, daß es sich bei den gefundenen Ergebnisse um gesicherte Werte handelt und nicht um statistische Streuungen. Da sich in einer verteilten Simulationsanordnung statt einem einzigen Experimentiersystem mehrere Experimentiersysteme vom Finalproduzenten bis Transportunternehmer befinden, ist eine gemeinsame Vorgehensweise bei der Versuchsplanung und der Durchführung der Experimente zu entwerfen.

Die Simulationssysteme der Partner senden Kenndaten, die über den gegenwärtigen Stand der Produktion in den jeweiligen Systemen Auskunft geben. Um eine Einflußnahme seitens der Experimentiersysteme zu gewährleisten, soll der Nachrichtentyp „Faktordaten“ eingeführt werden. Im folgenden sollen beispielhaft vier Faktoren vorgestellt werden, mit denen Einfluß auf die Steuerung der Materialversorgung genommen werden kann. Faktor A und B stellen Erweiterungen für die Regelbasis der Lkw dar:

Faktor A: „WENN *Materialbestand hoch*,
DANN *Wert des Lkw unbedeutend*.“

Faktor B: „WENN *Lkw verspätet*,
DANN *Wert des Lkw unbedeutend*.“

Beide Faktoren beeinflussen den Verhandlungswert eines Lkws und entscheiden somit auch über die Annahme oder Ablehnung durch den anfragenden Verbraucher. Faktor C bezieht sich auf den WENN-Teil von Regeln, die den Bestand an Material des Lkws mit in Betracht ziehen:

Faktor C: Einteilung des Bestands der Lkw
in 3 bzw. 5 Stufen

Die bisher genannten Faktoren gehören zur Ressource „Transportunternehmer“. Faktor D bezeichnet den WENN-Teil einer Regel zur Berechnung des Verhandlungswertes eines Auftrags von der Finalmontage:

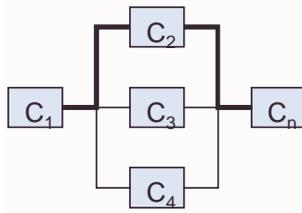
Faktor D: obere Zeitschranke bis zum Bereitstellungstermin
in der Montage von 8 auf 6 Stunden

Die obere Zeitschranke gibt an, daß alle Aufträge, deren Zeit bis zum Bereitstellungstermin größer als 8 bzw. 6 Stunden ist, einen kleinen Verhandlungswert erhalten. Der Verhandlungswert wird größer je näher der Bereitstelltermin rückt.

Mögliche Auswirkungen dieser Faktoren soll [Bild 51](#) zeigen. Zu sehen ist ein Beispiel zweier Zuteilungsszenarien für den Transport der Komponenten C_1 bis C_n der Zulieferanten zur Finalmontage. Im ersten Szenario ist Lkw Tr_1 damit betraut die Komponenten der Zulieferanten Su_1 bis Su_n zur Finalmontage zur bringen. Diese Vorgehensweise bedeutet zwar, die Transportkapazität des Lkws gut auszunutzen, dennoch kann der geringe Zeitpuffer bis zum Bereitstelltermin der Komponente C_1 schnell durch Verzögerungen zusammenschrumpfen. Staus, dichter Verkehr oder verspätete Fertigstellung einer Komponente bei einem der Zulieferanten führen zu einer verspäteten Montage. Eine Entlastung der Situation zeigt das zweite Szenario. Hier werden durch einen zweiten Lkw Tr_p die zeitkritischen Komponenten von Su_1 und Su_2 transportiert. So entstehen weitere Zeitpuffer bei den Zulieferanten und dem Transportunternehmer. Erkauft wird dieser Vorteil durch die geringere Auslastung der Lkws.

Oben genannte Faktoren beeinflussen, welches Szenario eintritt. So führen Faktor A und B dazu, daß der Verhandlungswert eines Lkws durch Verspätungen sinkt und damit ein anderer Lkw Tr_p die Transportaufträge für die Komponenten C_1 und C_2 der Zulieferanten erhält. Faktor C kann zu einer anderen Beurteilung des Bestands an Material eines Lkws und da-

Montagegraph



Legende

C_j	Komponenten j	Su_j	Zulieferant j
—	Vorrangbeziehung	$Tr_i=\{\dots\}$	Weg für Lkw i
—	Kritischer Pfad		Transportieren
	Lagern		Entladen
	Montieren		Beladen

Terminplan

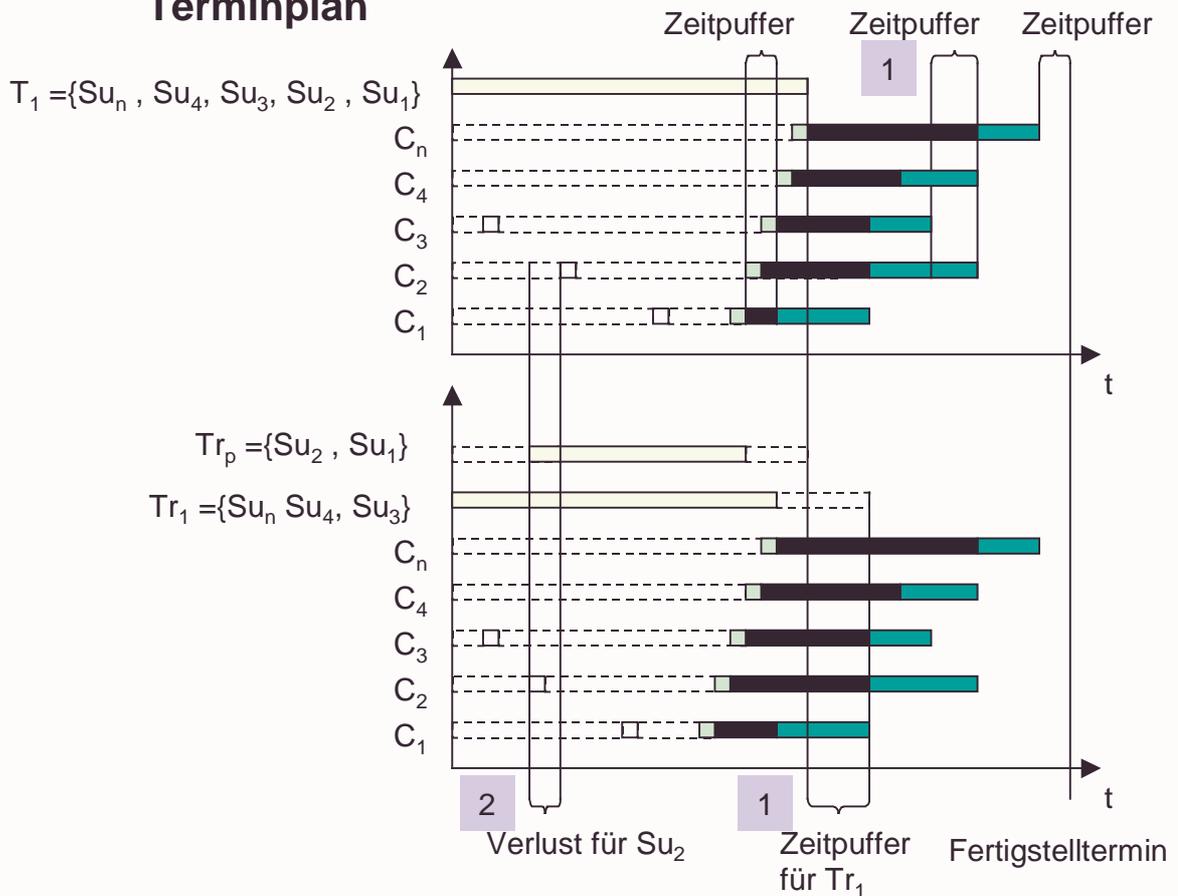


Bild 51: Wechselwirkung unterschiedlicher Szenarien

mit auch der Auslastung führen. Faktor C ändert die Bewertung der Transportaufträge, welches wiederum zu einem anderen Zuteilungsszenario führen kann.

Außerdem kommt hinzu, daß beide Szenarios von Finalproduzent, Zulieferanten und Transportunternehmer unterschiedlich bewertet werden. Der Transportunternehmer favorisiert das Szenario mit der höheren Auslastung der Lkws, während der Finalproduzent im anderen Szenario Vorteile durch eine getrennte Anlieferung und einer damit verbundenen höheren Versorgungssicherheit sieht. Die Zulieferanten erhalten durch dieses Szenario

ebenfalls zusätzliche Zeitpuffer in der Produktion (Bild 51 [1]) mit Ausnahme des Herstellers von Komponente C_2 , da dieser die Komponente früher bereitstellen muß (Bild 51 [2]).

Deshalb muß jeder Partner in einer verteilten Simulationsanordnung die Möglichkeit haben, über einen Beobachter Ergebnisse der Simulation für sich zu bewerten. Einstellungen der Faktoren müssen ausgehandelt werden. Welche Daten zwischen den Beobachtern zur Durchführung der Experimente ausgetauscht werden sollen, soll durch die Untersuchung der drei gängigsten Versuchspläne gezeigt werden.

5.3.1.1 Einfaktormethode

Die Einfaktormethode ist eine sehr einfache Art, um den Einfluß mehrerer Faktoren auf eine Zielgröße zu untersuchen. Eine Zielgröße ist dabei eine Größe die sich aus Kenndaten zusammensetzt und von den Partnern in der Materialversorgung unterschiedlich gewählt werden kann. Es wird jeweils nur ein Faktor variiert, während alle anderen Faktoren konstant gehalten werden. Die Variation der Faktoren, d.h. die Stufeneinstellungen für jeden Faktor, wird in der Regel aus Erfahrungswerten abgeleitet /67/.

Mit dieser Methode kann der Einfluß eines einzelnen Faktors auf die Zielgröße bei Konstanthalten der anderen Faktoren geschätzt werden. Bild 52 zeigt beispielhaft einen vereinfachten Versuchsplan für vier Faktoren auf das geschilderte Beispiel. Jeder der Faktoren A bis D hat in diesem Falle zwei Stufen, wobei die Vorzeichen (+) und (-) jeweils das Niveau der Stufeneinstellung darstellen. Ein positives Vorzeichen (+) bedeutet beispielsweise für die Faktoren A und B, daß die Regeln in der Wissensbasis der Lkw vorhanden sind, ein negatives Vorzeichen (-) ist gleichzusetzen mit einem Entfernen der Regeln aus der Wissensbasis.

Da Faktoren dezentral von den Beobachtern gesetzt werden, müssen sie über Nachrichten ausgetauscht werden. Tabelle 5 zeigt den Inhalt der Nachrichten über Faktoren. Der Wert

Exp. Nr.	Faktoren				Ergebnis E1
	A	B	C	D	
1	+	+	+	+	
2	-	+	+	+	
3	+	-	+	+	
4	+	+	-	+	
5	+	+	+	-	

 „Transportunternehmer“

 „Finalmontage“

Bild 52: Versuchsplan bei der Einfaktormethode

Nachrichtentyp	Beispiel
<pre>(Faktor :Id <Name> :Stufe <+/-> :Absender <Name> :Adresse <name>)</pre>	<pre>(Faktor :Id A :Stufe ? :Absender b_Transport :Adresse b_Montage)</pre>

Tabelle 5: Nachricht Faktor

eines Faktors muß dabei nur dem Beobachter bekannt sein, der diesen Faktor auch einstellt. Deshalb ist zwischen den Beobachtern nur der Name notwendig, zu den Simulationssystemen zusätzlich die Stufe. Jeder Beobachter erhält Nachrichten über alle Faktoren anderer Beobachter. Sind alle Faktoren beschrieben, kann ein Versuchsplan, wie in Bild 52 gezeigt, von den Beobachtern aufgestellt werden. Die Faktoren A bis C gehören dem Beobachter des Transportunternehmers, während Faktor D zu einem Zulieferanten gehört. Die Experimente können initialisiert werden.

Bei dem ersten Versuch mit der Einfaktormethode werden alle Faktoren auf die Stufe (-) gesetzt und die Wirkung auf die Ziele erfaßt (Ausgangsversuch). Ein Ziel für die Montage in diesem Beispiel könnte die Verringerung des Bestands sein. Ein Ziel für den Transportunternehmer ist, die Auslastung der Lkws zu erhöhen. Die Werte dieser Variablen können über die Kenngrößen der Simulationssysteme abgefragt werden. Beim zweiten Versuch wird der Faktor A in seiner Stufe auf (+) verändert und die Wirkung auf das Ziel gemessen. Bei einem dritten Versuch sind alle Faktoren auf der Ausgangsstufe (-) bis auf Faktor B, dessen Auswirkung auf das Ziel nun getestet wird. So werden fortlaufend alle Faktoren entsprechend behandelt.

Die Anzahl der bei dieser Methode durchzuführenden Versuche ist dabei gleich der Anzahl der betrachteten Faktoren plus dem Ausgangsversuch. Im dargestellten Beispiel also 5. Jeder hinzukommender Faktor erhöht somit die Anzahl der Versuche um einen weiteren Versuch.

5.3.1.2 Vollfaktorielle Versuchspläne

Bei vollfaktoriellen Versuchsplänen werden im Gegensatz zur Einfaktormethode mehrere Faktoren ausgewogen und gleichzeitig gegeneinander variiert. Dadurch wird es möglich, Mittelwerte über die einzelnen Stufeneinstellungen der Faktoren zu bilden und sogenannte Effekte zu berechnen. Unter einem Haupteffekt versteht man die mittlere Änderung der

Zielgröße bei einem Wechsel der Stufeneinstellungen eines Faktors /56/. Es wird also untersucht, um welchen Wert sich beispielsweise die Zielgröße Durchlaufzeit verändert, wenn der Faktor D von 6 (niedrige Stufe (-)) auf 8 (höhere Stufe(+)) gestellt wird. Für die Berechnung der Haupteffekte sei auf /31/ verwiesen.

Die Beeinflussung der Wirkung eines Faktors auf die Zielgröße durch die Einstellstufen einer oder mehrerer anderer Faktoren wurde als Wechselwirkung bezeichnet. Anhand der Richtung ihrer Wirkung werden Wechselwirkungen in synergetische und antiszynergetische eingeteilt (Bild 53).

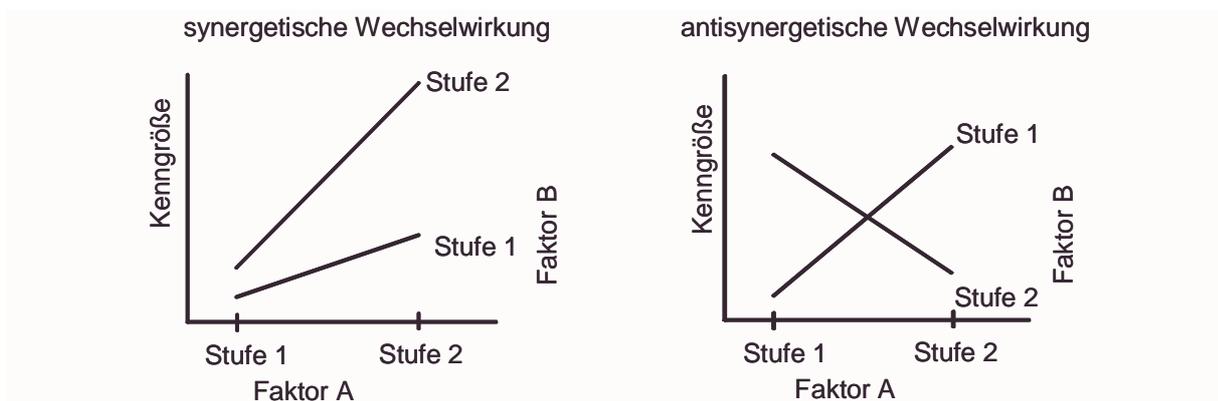


Bild 53: Wechselwirkungen

Vollfaktorielle Versuchspläne vom Typ 2^k bedeuten, daß k Faktoren mit zwei Stufeneinstellungen auf die Wirkung bezüglich eines Ziels, wie beispielsweise der Durchlaufzeit, untersucht werden. Da bei diesen Versuchsplänen alle möglichen Kombinationen der Faktoren mit ihren Stufen erfaßt werden, ergeben sich 2^k Versuche. Sollen nur 4 Faktoren berücksichtigt werden, ergibt sich damit eine Versuchsanzahl von 16. Zum Vergleich, bei der Ein-faktormethode betrug die Versuchsanzahl bei gleicher Faktorenanzahl lediglich 5.

Bei vollfaktoriellen Versuchen können die Faktoren auch mehr als zwei Stufen annehmen, z. B. drei Stufen, womit der Versuchsplan vom Typ 3^k wäre. Da mit der Anzahl der Stufen je Faktor, die Anzahl durchzuführender Experimente schnell steigt (bspw. 3^k , 4^k Experimente), werden drei oder noch höherstufige Versuche in der Praxis selten durchgeführt. Deshalb sollen weiterhin nur Versuchspläne mit zwei Einstellstufen verwendet werden. Der Aufbau eines vollfaktoriellen Versuchsplanes sollte in zwei Schritten erfolgen /76/:

- Erstellen der Planmatrix

Mit Hilfe der Planmatrix werden die durchzuführenden Versuche festgelegt. Die Darstellung der Planmatrix erfolgt in tabellarischer Form. Dabei stehen in den Spalten die zu untersuchenden Faktoren A, B und D mit den Stufeneinstellungen der Faktoren sowie die Wechselwirkungen der Faktoren (Bild 54).

Exp. Nr.	Faktoren			Wechselwirkungen				Ergebnis
	A	B	D	AB	AD	BD	ABD	
1	-	-	-	+	+	+	-	
2	+	-	-	-	-	+	+	
3	-	+	-	-	+	-	+	
4	+	+	-	+	-	-	-	
5	-	-	+	+	-	-	+	
6	+	-	+	-	+	-	-	
7	-	+	+	-	-	+	-	
8	+	+	+	+	+	+	+	

 „Transportunternehmer“

 „Finalmontage“

Bild 54: Planmatrix für drei Faktoren A,B und C

- Erstellen der Auswertematrix

Die Auswertematrix enthält neben den Spalten der einzelnen Faktoren zusätzliche Spalten für jede mögliche Wechselwirkung zwischen den Faktoren.

Die Durchführung eines vollfaktoriellen Versuchsplanes vom Typ 2^k liefert 2^k Ausprägungen des Zieles in Form von Zahlenwerten. Mit Hilfe dieser zunächst völlig unübersichtlichen Zahlenwerte sollen Antworten auf folgende Fragen gefunden werden:

- Welche Faktoren haben signifikanten Einfluß auf die Zielgröße?
- Wie groß ist der Einfluß der einzelnen Faktoren (Haupteffekt)?
- Zwischen welchen Faktoren besteht eine signifikante Wechselwirkung?
- Wie beeinflusst die Wechselwirkung die Zielgröße?

Vollfaktorielle Versuchspläne vom Typ 2^k ermöglichen die Berücksichtigung sehr vieler Faktoren und - im Gegensatz zur Einfaktormethode - vor allem auch deren Wechselwirkungen. Jedoch erfolgt dies mit dem Nachteil einer sehr großen Anzahl durchzuführender Versuche. Um einen Vollfaktorielle Versuchsplan aufzustellen, müssen nur die Faktoren bekannt sein. Deshalb werden keine weiteren Nachrichtenklassen benötigt.

5.3.1.3 Teilfaktorielle Versuchspläne

Vollfaktorielle Untersuchungen erfordern eine große Anzahl von Versuchen, die mit der Anzahl der zu untersuchenden Faktoren drastisch ansteigt. Bei nur sieben Faktoren je zwei Stufen müssen schon 128 Versuche 2^7 durchgeführt werden. Aus diesem Grund sind im

Hinblick auf die industrielle Praxis, Versuchspläne notwendig geworden, die zur Reduzierung des Versuchsaufwandes führen.

Teilfaktorielle Versuchspläne führen zu einer großen Verringerung der Anzahl durchzuführender Versuche, da in die Spalten der Wechselwirkungen aus der vollfaktoriellen Auswertematrix, weitere Faktoren zur Untersuchung eingeführt werden. Der teilfaktorielle Versuchsplan für beispielsweise die drei Faktoren A,B und D ist aus der vollfaktoriellen Auswertematrix für die zwei Faktorn A und B ableitbar, indem in die Spalte der Wechselwirkung (AB), die Faktor (D) eingesetzt wird. Dadurch reduziert sich die Anzahl der Versuche für die drei genannten Faktoren gegenüber dem vollfaktoriellen Versuchsplan von 16 auf 4. Die Anzahl n der Versuche läßt sich nach folgender Formel berechnen: $n=2^{(k-p)}$, wobei k die Anzahl der Faktoren und p die Anzahl der Wechselwirkungsspalten, in die zusätzliche Faktoren eingeführt werden (Bild 55).

Durch das Einsetzen eines zusätzlichen Faktors in eine Wechselwirkungsspalte findet eine Vermengung der Spalte statt. Die Auswertung einer solchen Spalte führt zu einem Wert, der aus dem Haupteffekt des neu eingesetzten Faktors und dem Wechselwirkungseffekt besteht. Die Vermengung von Haupt- und Wechselwirkungseffekten findet aber nicht nur in der Wechselwirkungsspalte statt, sondern auch in anderen Spalten.

Es zeigt sich, daß für alle Versuchspläne Faktoren und deren Einstellstufen ausgetauscht werden müssen. Die Entscheidung, welcher Versuchsplan gewählt wird, soll zwischen den Beobachtern festgelegt werden. Daher wird noch eine weitere Nachricht Versuchsplan benötigt (Tabelle 6).

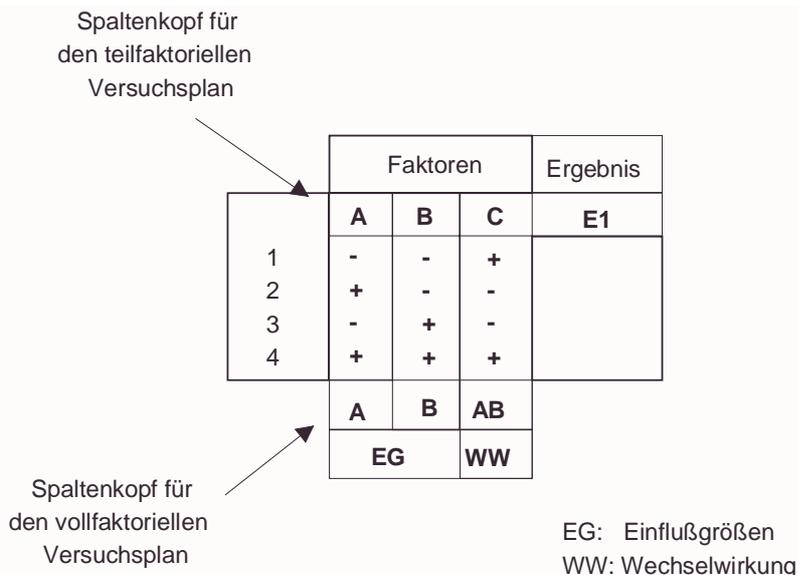


Bild 55: Teilfaktorieller Versuchsplan

Nachrichtentyp	Beispiel
(<i>Versuchsplan</i> : <i>Typ</i> <Name> : <i>Absender</i> <Name> : <i>Adresse</i> <Name>)	(<i>Versuchsplan</i> : <i>Typ</i> Einfaktormethode : <i>Absender</i> b_Montage : <i>Adresse</i> ?)

Tabelle 6: Nachricht Versuchsplan

5.3.2 Planung und Durchführung der Experimente

Bei der Planung der Durchführung steht die Frage im Vordergrund, wieviel Ergebnisdaten von einer Konfiguration erhoben werden müssen, um statistisch abgesicherte Schlußfolgerungen zu ziehen. Wenn beispielsweise festgestellt werden soll, ob der langfristige Durchschnitt einer Durchlaufzeit größer oder kleiner als zehn Sekunden ist und Datenmaterial aus 20 Simulationen zu dieser Fragestellung vorliegt, kann der Durchschnitt aus den einzelnen Durchlaufzeiten gebildet werden. Liegt sein Wert bei beispielsweise 10,3 Sekunden, taucht die Fragestellung auf, ob daraus mit hinreichender Sicherheit geschlußfolgert werden kann, daß der langfristige Durchschnitt wirklich bei 10,3 Sekunden liegt. Die Möglichkeit, daß zukünftige Simulationen des gleichen Systems die Feststellung widerlegen, soll dabei ausgeschlossen werden. Hier gesicherte Aussagen zu treffen, gehört zu den Aufgaben der Planung der Durchführung.

Hierbei kommen grundsätzlich Techniken, wie das Bilden von Konfidenzintervallen und Hypothesentests, zur Anwendung. Allerdings ergeben sich bei der Analyse von Simulationsdatenmaterial Schwierigkeiten, die das Festlegen von aussagekräftigen Konfidenzintervallen kompliziert gestalten können. Es handelt sich dabei nach /85/ um die Autokorrelation und das Problem der Anfangsverzerrung:

- Hinsichtlich der Autokorrelation ist festzustellen, daß die meisten Techniken der einfachen statistischen Analyse Daten erfordern, die Ausprägungen von unabhängigen, einheitlich verteilten Zufallsvariablen sind. Simulationsergebnisse erfüllen diese Anforderungen oft nicht. Dies gilt zum Beispiel für die Wartezeit von Lkws vor einer ausgelasteten Entladezone. Zwei aufeinanderfolgende Lkws warten hier immer auf die Abarbeitung der gleichen Vorgänger. Demzufolge haben sie oft ähnliche Wartezeiten und die korrespondierenden Daten sind nicht unabhängig voneinander, sondern positiv korrelierend. Die Korrelation zeitlich geordneter Ausprägungen eines Merkmals wird Autokorrelation genannt.

Die Autokorrelation bei Simulationsdaten ist häufig sehr hoch. Da derartig ausgeprägte Daten die Eigenschaft der Unabhängigkeit nicht erfüllen, kann die unbedachte Anwendung einfacher statistischer Verfahren im Zusammenhang mit Simulationen zu falschen Ergebnissen führen. Korrelierende Daten tendieren oft dazu, ihren Wert wesentlich langsamer zu verändern, als unabhängige Daten. Wenn dies bei der Berechnung der Varianz ignoriert wird, dann führen die Berechnungen zu einer Varianz, die niedriger ist als die eigentliche Varianz des Systems.

- Das Problem der Anfangsverzerrung ist der Einfluß des Ausgangszustandes einer Simulation. Oft geht es darum, weitgehend ausgelastete Systeme zu simulieren, beispielsweise eine Montagelinie mit mehreren Arbeitsplätzen und einer großen Anzahl von Teilen, die sich gleichzeitig auf den verschiedenen Bearbeitungsstufen befinden. Es ist wesentlich einfacher, eine Simulation eines solchen Systems mit einem leeren Modell zu starten, in dem sich keine Teile in den verschiedenen Stationen befinden, als eine Anfangssituation zu definieren, in der alle Teile auf die Stationen verteilt sind. Sollen Größen wie Mittelwerte oder Standardabweichungen ermittelt werden, so führt ein Einbeziehen der Einschwingphase zur einer Verzerrung der Werte.

Da die ersten Teile durch ein weitgehend leeres System fließen und somit keine durch Staus erzwungene Wartezeiten auftreten, sind ihre Durchlaufzeiten niedriger als diejenigen späterer Teile. Durch eine Aufnahme dieser Werte in den zu analysierenden Datensatz wird der Durchschnitt der Durchlaufzeit verringert. Die Simulation muß so lange durchgeführt werden, daß über die Einschwingphase hinaus ausreichende Stichproben entnommen werden können.

Zwei Techniken, um Konfidenzintervalle basierend auf positiv korrelierenden Simulationsdaten zu berechnen, sind:

- die Methode der gebündelten Mittelwerte,
- die Methode der unabhängigen Wiederholungen.

Beide Methoden basieren auf der Annahme, daß unter der Voraussetzung, daß das Zeitintervall ausreichend lang gewählt ist, die statistischen Datensammlungen in den jeweiligen Zeitintervallen als voneinander unabhängig betrachtet werden können /58/. Annähernd unabhängige Stichproben kann man durch mehrfache Wiederholung derselben Systemkonstellation mit unterschiedlichen Startwerten für die Zufallszahlgeneratoren (Methode der unabhängigen Wiederholungen) oder durch die Aufteilung eines langen Simulationslaufs in Zeitintervalle (Methode der gebündelten Mittelwerte) erreichen.

Vor dem Hintergrund der Anfangsverzerrung hat die Methode der gebündelten Mittelwerte den Vorteil, daß die insgesamt erforderliche Simulationszeit kürzer ist, da die Einschwing-

phase nur einmal für jede Konstellation abgeschnitten werden muß. Im Gegensatz dazu entsteht bei der Methode der unabhängigen Wiederholungen für jede Wiederholung mit der gleichen Konstellation eine Einschwingphase.

Für die Kommunikation mit der Simulationsebene bedeutet dies, daß drei weitere Nachrichtentypen hinzukommen. Durch den Typ „Simuliere“ wird eine Simulation gestartet, wobei neben den üblichen Werten für Adresse und Absender noch die Simulationsdauer mit Einheit spezifiziert werden muß. Um die Methode der gebündelten Mittelwerte durchzuführen, wird nach dem Ende einer Simulationsphase wieder eine Nachricht „Simuliere“ geschickt, um einen Simulationslauf fortzuführen. Während dieser Phase können die Werte für die Kenngrößen erfragt werden. Die Nachricht „Reset“ führt hingegen zum Zurücksetzen einer Simulation auf den Anfangszustand und kann für die Methode der unabhängigen Wiederholungen genutzt werden (Tabelle 7).

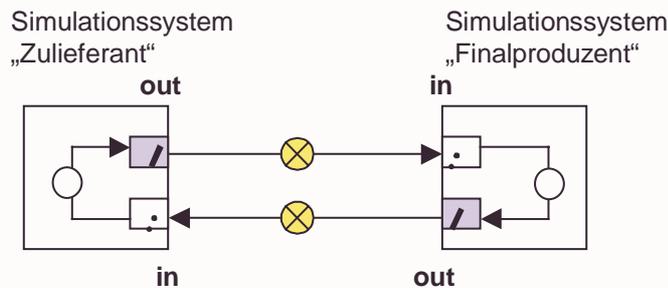
Nachrichtentyp	Beispiel
(<i>simuliere</i> : <i>dauer</i> <Zeit> : <i>einheit</i> <Zeiteinheit> : <i>absender</i> <Name> : <i>adresse</i> <Name>)	(<i>simuliere</i> : <i>dauer</i> 10 : <i>einheit</i> sec : <i>absender</i> b_spedition : <i>adresse</i> ?)
(<i>reset</i> : <i>absender</i> <Name> : <i>adresse</i> <Name>)	(<i>reset</i> : <i>absender</i> b_spedition : <i>adresse</i> m_spedition)

Tabelle 7: Nachrichten zur Durchführung einer Simulation

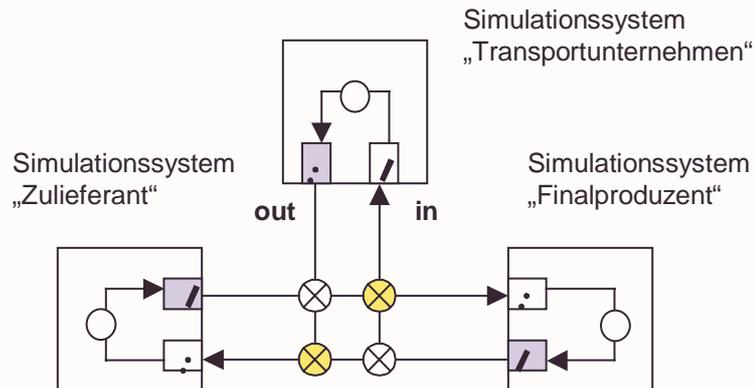
Für die Experimentiersysteme ergibt sich damit Bild 56. Zunächst einigen sich die Beobachter auf die Faktoren und den Versuchsplan. Danach werden die Einstellstufen für das erste Experiment weitergegeben und dieses Experiment gestartet. Je nach Durchführungs- und Versuchsplanung werden Wiederholungen und nachfolgenden Experimente durchgeführt.

diese Informationen abonnieren. Jedes Subsystem ist dafür sowohl mit einem Empfänger als auch mit einem Sender ausgestattet. So trägt das Simulationssystem „Zulieferant“ die Nachricht Material in seinen Sender ein. Da das Simulationssystem „Transportunternehmer“ die Nachricht Material vom Simulationssystem „Zulieferant“ abonniert hat, erhält es sofort eine Kopie der Nachricht. Diese befindet sich im Empfänger. Aus der Kopie kann der Transportunternehmer die Bedingungen erfahren, die erfüllt werden müssen, um das Material weiterzuverarbeiten. Sobald diese erfüllt sind, wird die Nachricht aus Sender und Empfänger entfernt.

Die einfachste Kopplung zweier Subsysteme mit Hilfe des Ausführungssystems ist in Bild 57 (a) dargestellt. Das Simulationssystem „Zulieferant“ besteht aus einem Simulationsmodell eines Lager, in dem Behälter für die Montage vorkommissioniert werden. Das Simulationssystem „Finalproduzent“ simuliert die Montage, der die vollen Behälter bereitgestellt werden sollen. Die leeren Behälter gehen zurück in das Lager. Da Zulieferant und Finalpro-



a) Einfache Kopplung ohne Ortswechsel



b) Einfache Kopplung mit Ortswechsel

Legende

	Quelle		Prozeß		Nachricht
	Senke		Nachrichtenfluß		Kopie der Nachricht
	Ort A		Ort B		

Bild 57: Einfache Kopplungen der Ausführungssysteme

duzent nahe beieinander liegen, soll der Transport vernachlässigt werden. Das entspräche den Varianten 7 und 8 des Materialversorgungsprozesses aus Kapitel 2.1.1.

In den Sender des Simulationssystems „Finalproduzent“ werden Nachrichten Material über die leeren Behälter eingetragen. Für diese Kopplung notwendige Attribute der Nachricht Material sind „*Id*“, „*Typ*“, „*Absender*“ und „*Adresse*“. Das Simulationssystem „Zulieferant“ wartet auf Kopien dieser Nachricht im Empfänger, wobei es nur die Nachrichten Material abonniert, deren Attribute „*Adresse*“ und „*Absender*“ entsprechend gesetzt sind. Sobald eine Kopie im Empfänger des Simulationssystems „Zulieferant“ eingetragen wird, kann es mit der Kommissionierung beginnen und trägt dann den gefüllten Behälter in den eigenen Sender ein. Eine Nachricht über die Ankunft eines vollen Behälters geht an die Montage, in dessen Empfänger eine Kopie eingetragen wird. Diese Form der Kopplung setzt voraus, daß die Ortswechsel der Objekte (Behälter) von den jeweiligen Systemen durchgeführt werden können oder diese Eigenschaft für die Simulationsuntersuchung nicht relevant ist.

Für Ortswechsel in einer Simulationsanordnung sind die Simulationssysteme „Transportunternehmer“ zuständig. Das entspräche den Varianten 1 und 6 des Materialversorgungsprozesses aus Kapitel 2.1.1. Bild 57 (b) zeigt diesen Fall, wobei angenommen wird, daß die Ein- bzw. Ausgabestation des Lagers und der Montage nicht an demselben Ort liegen. In diesem Fall erhält das Lager die leeren Behälter vom Transport, dieser wiederum von der Montage. Umgekehrt erhält das Montagesystem die vollen Behälter vom Transport. Dementsprechend schicken die Simulationssysteme „Zulieferant“ und „Finalproduzent“ Nachrichten über Material an das Simulationssystem „Transportunternehmer“ und umgekehrt. Die Nachricht Material hat für diesen Fall das Attribut *ort*. Nachrichten vom Simulationssystem „Zulieferant“ haben A als Ortsangabe und Nachrichten vom Simulationssystem „Finalproduzent“ B. So erhält der Transport im Empfänger eine Kopie der Nachricht „Material“ vom Typ „voller Behälter“ mit der Ortsangabe A. Sobald sich ein Transportmittel an diesem Ort befindet, wird die Nachricht entfernt. Danach transportiert das Transportmittel das Material an den Zielort, der durch das Attribut „*Adresse*“ bekannt ist. So erhält die Montage eine Kopie der Nachricht „Material“.

Die bisher betrachteten Kopplungen wurden aus einfachen Ketten bestehend aus den Subsystemen für Zulieferant, Transportunternehmen und Finalproduzent gebildet. Bei der Einführung der Nachricht Transportmittel wurde schon angedeutet, daß Transportmittel ebenfalls zwischen den Simulationssystemen von Zulieferanten, Transportunternehmen und Finalproduzenten wechseln können. Beispielsweise fährt ein Lkw an eine Entladezone beim Finalproduzenten. Die Entladezone ist Bestandteil des Simulationssystems „Finalproduzent“. So ergibt sich eine Subsystemkette, in der Lkws vom Simulationssystem „Transportunternehmer“ zum „Finalproduzenten“ wechseln. Eine andere Subsystemkette beschreibt den Materialtransport vom Zulieferanten zum Finalproduzenten. Ein Simulationssystem

„Lkw“, das beispielsweise die Be- und Entladevorgänge beschreibt, verknüpft beide Subsystemketten.

In Bild 58 ist eine solche Verknüpfung dargestellt. Das Simulationssystem „Finalproduzent“ und „Transportunternehmen“ tauschen Nachrichten über das Simulationssystem „Lkw“ aus. Um eine Nachricht über einen Lkw zu erhalten, werden für das Simulationssystem „Finalproduzent“ die Attribute „Adresse“ und „Ort“ benötigt. So empfängt das Simulationssystem „Finalproduzent“ alle Nachrichten „Transportmittel“, dessen Attribute „Adresse“ und „Ort“ mit denen des Simulationssystems „Finalproduzent“ übereinstimmen.

Eine weitere Variante für Subsystemnetze entsteht, wenn Material zwischen mehreren Zulieferanten und Finalproduzenten über Transportunternehmer ausgetauscht wird. In Bild 59 wird ein Netz dargestellt, in dem Material zwischen den n Zulieferanten, den o Finalproduzenten und den m Transportunternehmen ausgetauscht wird. Dabei konkurrieren im Extremfall die beteiligten Transportmittel um die Aufträge, sofern nicht im Vorfeld Kontingente für die einzelnen Ressourcen ausgehandelt wurden. Jedoch können Verzögerungen bei der Bereitstellung von Material schnell Situationen entstehen, in denen der Plan dynamisch an die gegebene Situation angepaßt werden muß.

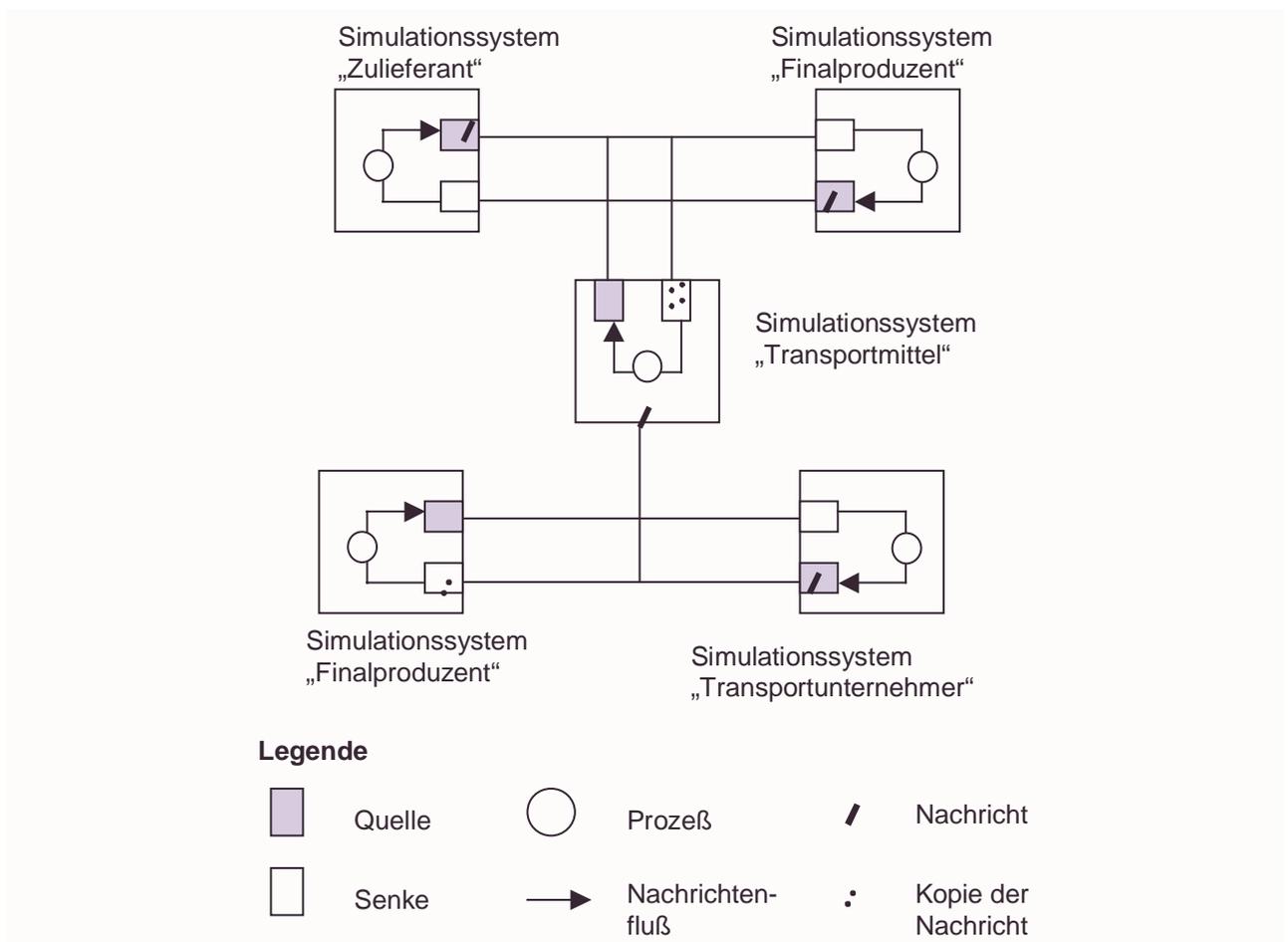
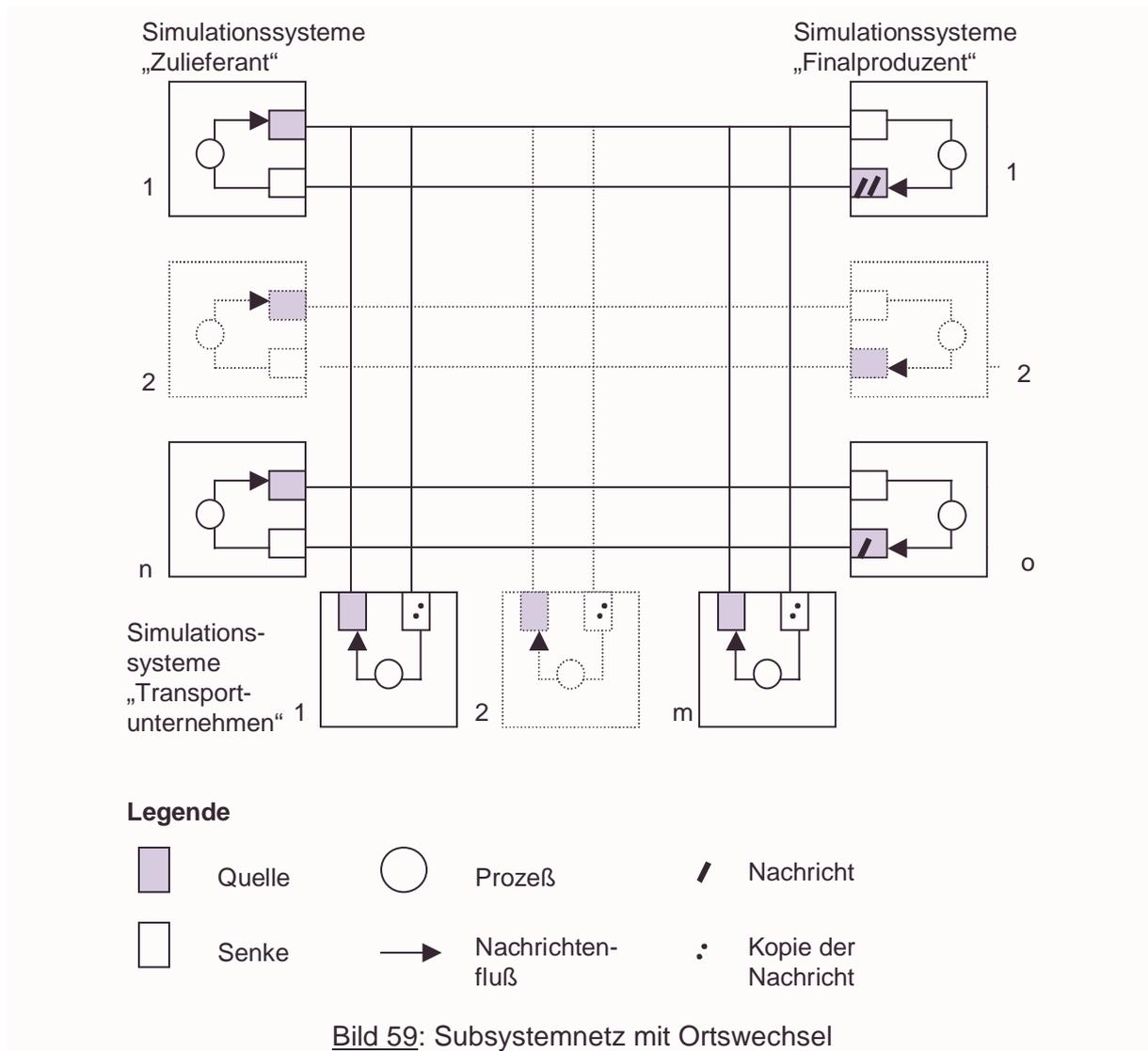


Bild 58: Kopplung zweier Subsystemketten

Dadurch, daß Material nur zu bestimmten Simulationssystemen der Finalproduzenten geliefert werden soll oder Partner in der Materialversorgung nur einen Materialtyp bereitstellen, muß eine Auswahl getroffen werden, wer Nachrichten des Typs Material empfangen darf und wer nicht. So können Transportunternehmen sich beispielsweise in diesem Netz nur auf den Transport bestimmter Komponenten (Material) spezialisieren. Beispielsweise benötigt die Ressource o nur Komponenten von den Zulieferanten 1 und 2. Den Transport können die Transportunternehmen 1 und m durchführen (Bild 59). Die Auswahl, wer welche Aufträge erhält soll vom Informationssystem gesteuert werden.



5.4.1.2 Informationssysteme

Die Kopplung der Ausführungssysteme kann beim *publish-and-subscribe* Verfahren durch Einstellungen im Empfänger und im Sender in der Nachricht Material oder Transportmittel

selbst realisiert werden. Ein Empfänger wie beispielsweise das Simulationssystem „Transportunternehmer“ meldet sich für die Nachricht Material sowie bestimmte Attributwerte an. Ebenso können vom Sender einer Nachricht deren Inhalte verändert oder gesetzt werden. Mit Hilfe dieser Techniken soll vom Informationssystem das Ausführungssystem gesteuert werden.

In einem Subsystemnetz, wie es in Bild 59 dargestellt ist, gibt es alternative Simulationssysteme, welche die Weiterverarbeitung des Materials vornehmen können. So könnte das Simulationssystem „Zulieferant 1“ zwischen den Simulationssystemen „Transportunternehmen 1 bis n“ auswählen, wer den Weitertransport des Materials vornimmt. In bezug auf den Materialfluß im Materialversorgungsprozeß spricht man hier von einer Verzweigung. Auf der anderen Seite werden beim Finalproduzenten unterschiedliche Materialflüsse zusammengeführt. In beiden Fällen muß eine Entscheidung getroffen werden, welches System das Material weiterverarbeitet, beziehungsweise welches Material zuerst weiterverarbeitet wird.

Bild 60 zeigt eine einfache Zusammenführung. Hier kann das Simulationssystem „Finalproduzent“ über die Reihenfolge der Weiterverarbeitung entscheiden. Bild 61 zeigt eine einfache Verzweigung. Verzweigungen stellen Entscheidungspunkte dar. Es muß festgelegt werden, welches Subsystem für die Weiterverarbeitung verantwortlich ist. An diesen Entscheidungspunkten ist das Attribut „Adresse“ der Nachricht Material noch nicht definiert. Dies gilt nur, wenn eine solche Nachricht bereits vorhanden ist.

Grundsätzlich steht die Auftragsvergabe vor dem Materialfluß. Aufträge gehören zum Informationssystem und werden über das gleiche Verfahren übermittelt wie die Nachricht Ma-

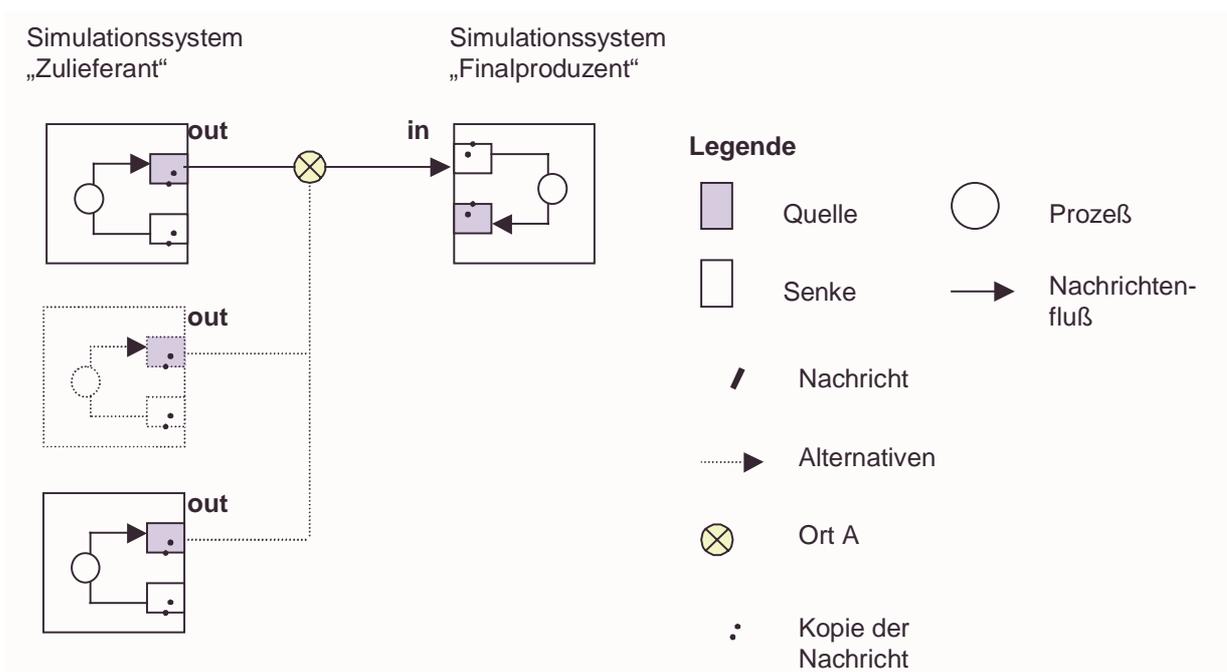
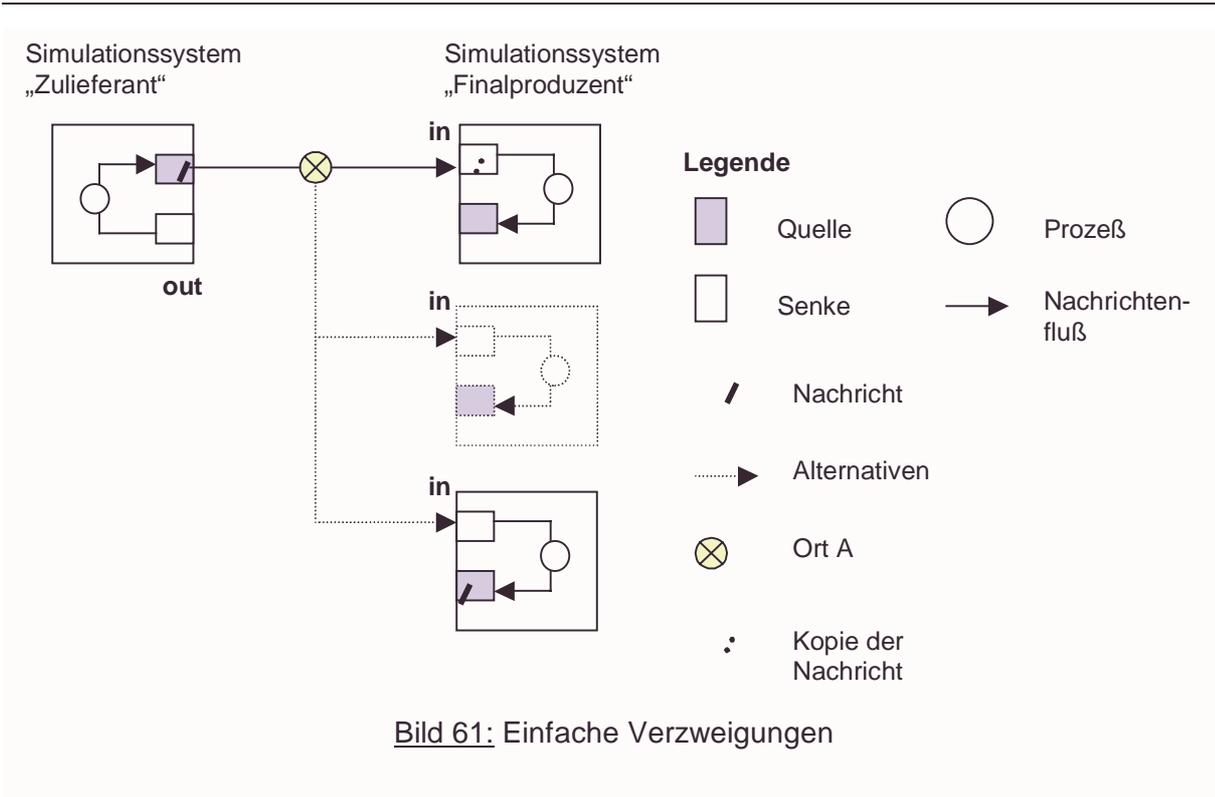


Bild 60: Einfache Zusammenführung



material des Ausführungssystems. Die Nachricht Auftrag bleibt allerdings solange im Sender und als Kopie im Empfänger bis der Auftrag erfüllt ist. In einer Entscheidungssituation zeigt ein Auftrag an, wer die Verantwortung erhält, das Material weiterzuverarbeiten. Ist ein Auftrag erteilt, nimmt der Sender die Einstellung des Attributs „Adresse“ vor und der Empfänger gibt den Absender als Empfangskriterium an. Die Frage, wer den Auftrag in einer Entscheidungssituation erhält, wird durch das im Kapitel 5.2.4 aufgestellte Verhandlungsschema festgelegt.

Um eine dynamische Anpassung an geänderte Randbedingungen zu erreichen, muß ein System in der Lage sein, schnell und gut eine Situation zu bewerten. Zur Bewertung können Kenndaten herangezogen werden. Gemäß der in Kapitel 5.2.3 eingeführten Aufteilung werden Kenndaten unterschieden in Lager, Transport, Fertigung, Montage und Auftrag. Diese Kenndaten können von den Simulationssystemen im Informationssystem veröffentlicht werden. Beispielsweise bleibt eine Nachricht „Kenndaten.Lager“ während der gesamten Simulation im Sender erhalten und wird vom Simulationssystem bei Veränderungen aktualisiert. Eine Kopie der Nachricht ist in allen Empfängern so lange vorhanden wie sie diese abonnieren möchten. So ist jedes Subsystem in der Lage sich veröffentlichte Kenndaten der anderen Subsysteme zu holen und diese für sich zu bewerten.

Bild 62 zeigt den Austausch von Kenndaten. Zunächst führt ein Ereignis aus dem Ausführungssystem zu einer Zustandsänderung. Beispielsweise kann sich der Bestand im Lager verändert haben. Alle Simulationssysteme in der Simulationsanordnung, die „Kenndaten.Lager.Bestand“ abonniert haben, erhalten eine aktualisierte Kopie der Nachricht. Auf

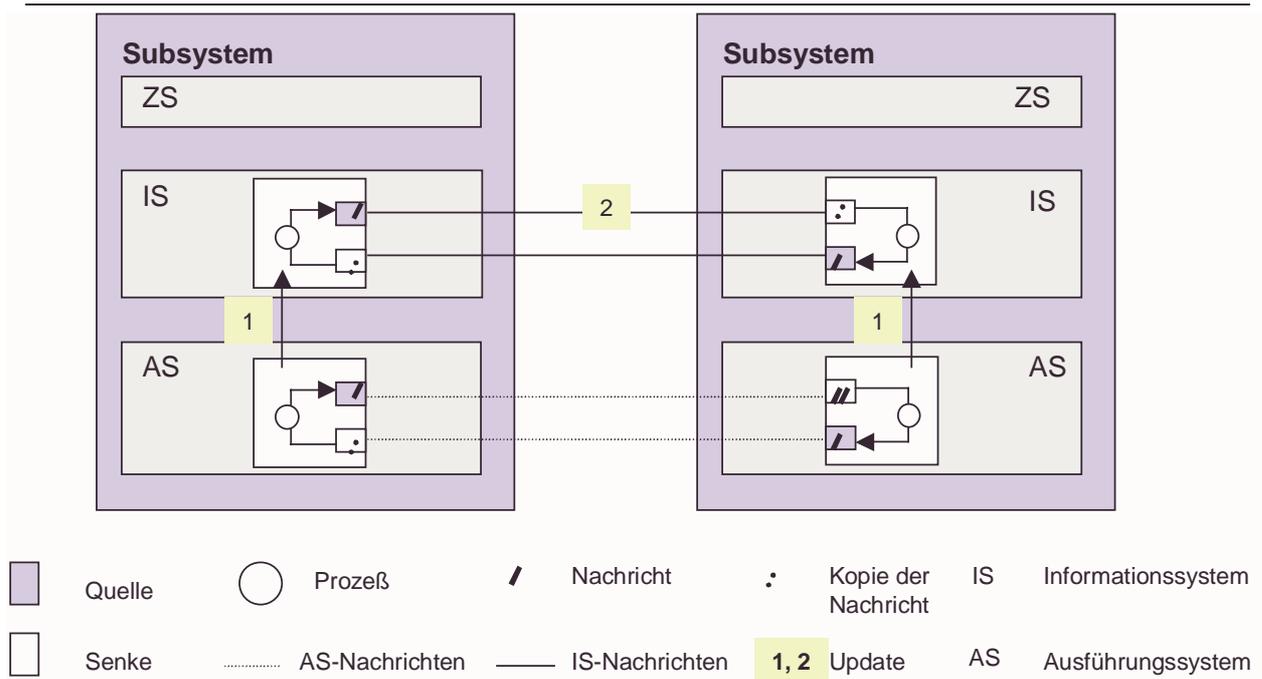


Bild 62: Austausch von Kenndaten

diese Weise lassen sich alle Simulationssysteme in der Simulationsanordnung mit Nachrichten über Kenndaten versorgen. Bei einer Verzweigung, wie in Bild 61 dargestellt, kann beispielsweise eine Lieferung zu dem Partner mit dem geringsten Bestand an Material geschickt werden. Auf diese Weise lassen sich bereits einfache Prioritätsregeln implementieren.

5.4.2 Nachrichtenaustausch durch High Level Architecture (HLA)

5.4.2.1 Klassenhierarchie

Die beschriebenen Subsysteme setzen unterschiedliche Anforderungen an die Kommunikation. Ressourcen und Verbraucher finden sich über Sprachakte der Agententheorie, wobei diese gegebenenfalls einen Broker in Anspruch nehmen. Im Ausführungssystem informieren sie sich untereinander über Material- und Betriebsmitteldaten. Das Informationssystem leitet Nachrichten über Auftrags-, Kenn- und Faktordaten weiter. Für die zuletzt genannten Nachrichten reicht das *publish-and-subscribe* Verfahren, welches durch HLA zur Verfügung gestellt wird. Für komplizierte Sprechakte soll COOL [7] eingesetzt werden, wobei HLA [23] als Kommunikationssystem für die Nachrichten des Verhandlungsschemas eingesetzt werden soll.

Die beschriebene Kommunikation der Subsysteme soll jetzt mit Hilfe der Methode HLA umgesetzt werden. Bild 63 zeigt hierfür die Klassenhierarchie für das *publish-and-subscribe* Verfahren. Am untersten Ende der Hierarchie stehen jeweils die Basisklassen, aus denen die Subsysteme abgeleitet werden sollen. Attribute und Methoden dieser Klassen werden

vererbt. Für den Nachrichtenaustausch stellt HLA die Klasse *RTIAmbassador* und *FederateAmbassador* zur Verfügung. Um eine genaue Übersicht der Attribute und Methoden dieser Klassen zu erhalten, sei auf /21/, /22/, /23/ bzw. auf das Kapitel 3 hingewiesen.

Über den *FederateAmbassador* erhält das Subsystem Informationen über Nachrichten anderer Subsysteme. Daraus folgt die direkte Beziehung des *FederateAmbassadors* zu der Empfänger-Klasse. Die Empfänger-Klasse ist eine Liste (*Queue*), in der die Kopien der Nachrichten anderer Subsysteme eingetragen werden. Damit Nachrichten-Klassen wie Materialdaten oder Kenndaten in eine Liste aufgenommen werden können, erhalten sie die Voraussetzungen hierfür von der Klasse „Element“ durch Vererbung. Auf die gleiche Weise ist die Sender-Klasse eine Liste (*Queue*), in die Nachrichten des Subsystems eingetragen werden. Diese Nachrichten werden über den *RTIAmbassador* an andere Subsysteme weitergeleitet. Des weiteren wird über diese Verbindung gesteuert, welche Nachrichten empfangen werden sollen. So kann der Empfänger auswählen, welche Nachrichten in seine Liste eingetragen werden.

Von der Sender- und Empfängerklasse erben die Klassen für die Kopplung der Subsysteme. Jedes Subsystem kann dabei entweder von der Klasse AS-Kopplung oder IS-Kopplung oder von beiden erben. Beispielsweise reicht es für einen Beobachter aus, eine IS-Kopplung zu besitzen, während andere Subsysteme beide Kopplungen benötigen.

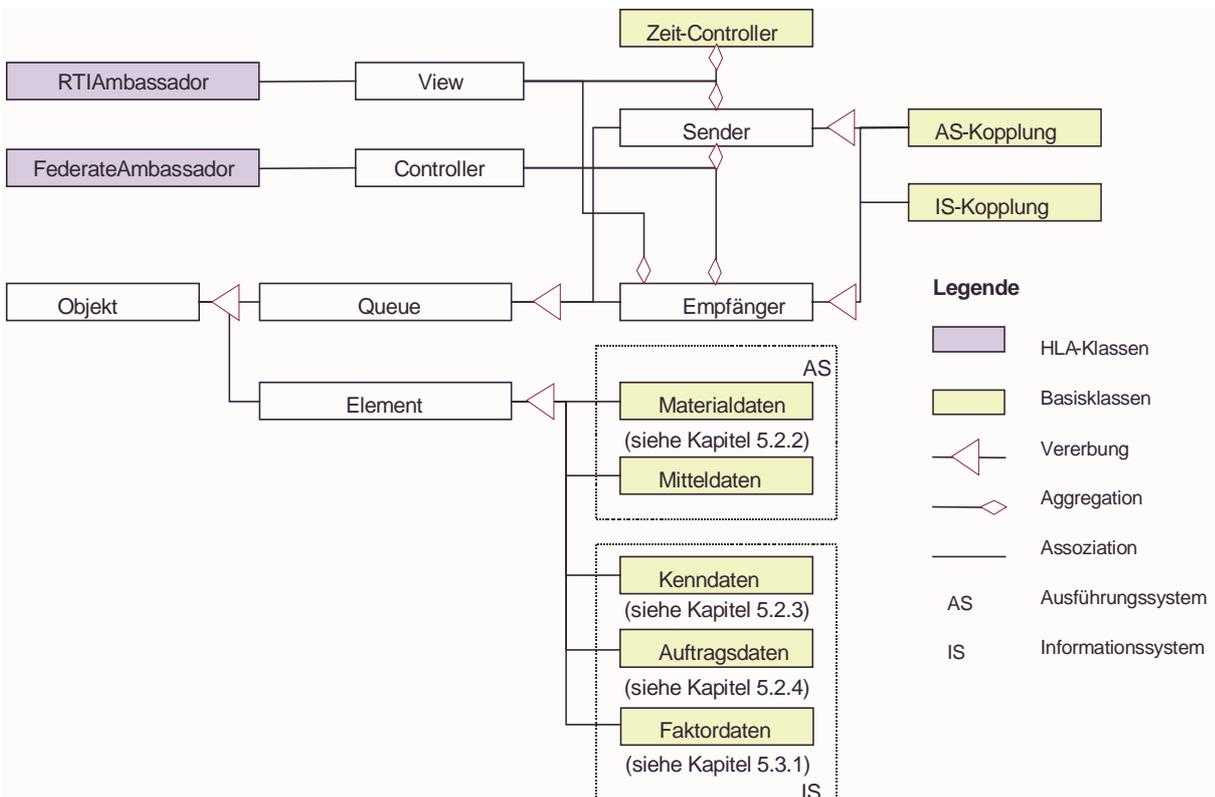


Bild 63: Klassenhierarchie

5.4.2.2 Zeitsteuerung

Die Zeitsteuerung ist für die verteilte Simulation unerlässlich (Kapitel 3.1.1). Zwei Simulationssysteme „Zulieferant“ und „Finalproduzent“ tauschen über die Sender-Empfänger Beziehung Material aus. In der Simulation können die verwendete Software oder die Hardware entscheidend dazu beitragen, daß die logische Simulationszeit in dem einen System schneller abläuft als in dem anderen. Werden die Nachrichten mit einer Zeitmarke versehen, besteht die Möglichkeit, daß eines der Systeme eine Nachricht vom anderen System erhält, dessen Zeitmarke kleiner ist als die logische Simulationszeit im System.

Die Zeitsteuerung nimmt die zeitliche Abstimmung der Nachrichten vor. Dabei wird davon ausgegangen, daß beide Systeme Nachrichten für das jeweils andere produzieren. Material im Sender des einen Modells muß vom anderen Modell verarbeitet werden und zwar zur richtigen logischen Zeit. Dafür erhalten die Nachrichten Zeitmarken. Dieses wird vom RTI übernommen. Für die Modelle muß jetzt nur noch dafür gesorgt werden, daß interne Ereignisse, das sind Ereignisse, die vom Modell selbst erzeugt werden, mit den Nachrichten so eingereicht werden, daß keine Überschneidungen entstehen.

Bild 64 zeigt den Algorithmus zur Integration von Nachrichten für ein konservatives Protokoll. Ein *NextEventRequest* mit dem Zeitpunkt des nächsten lokalen Ereignisses (t_{lokal}) wird an das *Federation Management* (RTI) geschickt. Wenn eine Nachricht verarbeitet werden muß, ist der Rückgabewert der Funktion gleich der Zeitmarke der Nachricht (t_{grant}). Liegt keine Nachricht vor, ist der Rückgabewert gleich der Zeitmarke des nächsten lokalen Ereignisses. Im ersten Fall ist der Simulator aufgefordert, die Nachricht zu verarbeiten. Im letzteren Fall kann das Simulationssystem ohne Unterbrechung zur Bearbeitung des lokalen Ereignisses übergehen.

Alle Subsysteme nehmen an der Zeitsteuerung teil. Für den Beobachter werden feste Zeitabschnitte T_{fort} vorgegeben, die sich für den Beobachter gemäß der Methode der gebündelten Mittelwerte oder der unabhängigen Wiederholungen berechnen. Zu Beginn eines Simu-

```
While (simulation) do
   $t_{\text{lokal}}$  = Nächstes lokales Ereignis
   $t_{\text{grant}}$  = nextEventRequest(  $t_{\text{lokal}}$  )
  if (  $t_{\text{grant}} < t_{\text{lokal}}$  ) then
    /* Verarbeite eine Nachricht */
  else
    /* Verarbeite ein lokales Ereignis */
  end if
End while
```

Bild 64: Algorithmus zur Integration externer Ereignisse

lationsexperiments setzen die Beobachter die Faktordaten. Danach verarbeiten sie nach jedem Zeitabschnitt die Nachrichten über Kenndaten.

5.4.2.3 Verhandlungen in der Coordination Language (COOL)

Konversationsklassen und -regeln

Für die Nachrichtentypen Material-, Betriebsmittel-, Kenn-, Faktor- und Auftragsdaten bietet sich eine direkte Umsetzung mit Hilfe des *publish-and-subscribe* Verfahren in HLA an, da hier kein kompliziertes Frage-Antwortschema benötigt wird. Anders verhält es sich mit dem Verhandlungsschema. Hier tritt der Anfragende über den Broker in einen Dialog mit mehreren Bietenden. Für die Umsetzung wird die Coordination Language (COOL) verwendet. Während die Konversation des Brokers sich im wesentlichen auf das Beantworten und Weiterleiten einer Anfrage beschränkt, gestaltet sich die eigentliche Verhandlung komplizierter.

Hierfür sollen im folgenden drei Konversationsklassen unterschieden werden:

1. Verhandlungsschema: Ein Verbraucher (Simulationssystem „Zulieferant“), der eine Resource (Simulationssystem „Transportmittel“) benötigt, initiiert eine Verhandlung, indem er die Klasse „Verhandlungsschema“ instanziiert. Bild 65 zeigt das Zustandsdiagramm und Tabelle 8 gibt die dazugehörigen Regeln an. Es werden vier Zustände unterschieden. In den ersten Zustand „Verhandlungswerte angefragt“ gelangt das Simulationssystem „Zulieferant“, wenn es eine Nachricht an einen Broker geschickt hat, um Angebote zu erhalten. Danach melden sich Simulationssysteme mit ihrem Verhandlungswert und der Broker gibt die Anzahl der Teilnehmer an der Verhandlung bekannt. Nachdem sich alle Teilnehmer gemeldet haben, werden diese nach ihrem Verhandlungswert sortiert. Dem Simulationssystem mit dem höchsten Verhandlungswert wird zuerst geantwortet,

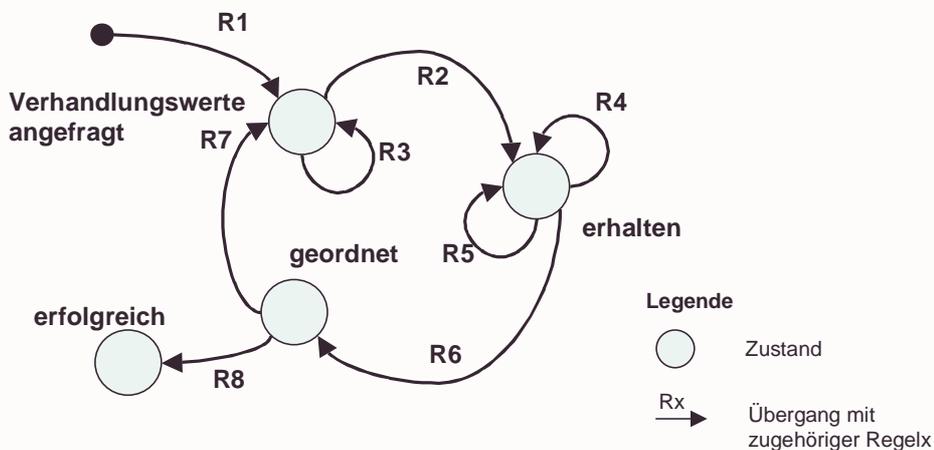


Bild 65: Verhandlungsschema in COOL

Regel:	WENN-Teil	DANN-Teil
R1	START	SENDE Nachricht „AnfrageVerhandlungswert“ zum Broker
R2	„Verhandlungswerte angefragt“ UND ERHALTEN Nachricht „Verhandlungswert“	„Bewerbung“; KONVERSATION „Anfrage“ mit Absender der Nachricht; SETZE aktuelle Teilnehmeranzahl auf 1
R3	„Verhandlungswert angefragt“ UND ERHALTEN Nachricht „Teilnehmer“ vom Broker	SETZE maximale Teilnehmeranzahl auf Wert aus der Nachricht
R4	„Bewerbung“ UND ERHALTEN Nachricht „Teilnehmer“ vom Broker	SETZE maximale Teilnehmeranzahl auf Wert aus der Nachricht
R5	„Bewerbung“ UND ERHALTEN Nachricht „Verhandlungswert“	KONVERSATION „Anfrage“ mit Absender der Nachricht; ERHÖHE aktuelle Teilnehmeranzahl um 1
R6	„Bewerbung“ UND aktuelle Teilnehmeranzahl = maximale Teilnehmeranzahl	„Teilnehmer sortiert“ SORTIERE Teilnehmer nach Verhandlungswert
R7	„Teilnehmer sortiert“ UND Verhandlungen ohne Erfolg	„Verhandlungswert angefragt“; SENDE Nachricht „AnfrageVerhandlungswert“ zum Broker
R8	„Teilnehmer sortiert“ UND Verhandlung erfolgreich	ENDE

Tabelle 8: Konversationsregeln für das Verhandlungsschema

den anderen danach. Dabei wird ihnen ebenfalls ein Verhandlungswert mitgeteilt.

2. Anfrage: Für jeden Teilnehmer (Simulationssystem „Transportmittel“) einer Verhandlung erzeugt das Simulationssystem „Zulieferant“, das eine Verhandlung begonnen hat, eine Instanz der Klasse Anfrage und wartet so lange im Zustand „Verhandlungswert erhalten“ bis dem Simulationssystem „Transportmittel“ entweder eine Ablehnung oder eine Annahme seines Verhandlungswertes geschickt werden soll. Mit der Annahme erhält das Simulationssystem „Transportmittel“ gleichzeitig den Verhandlungswert des Simulationssystems „Zulieferant“. Damit kann das Simulationssystem „Transportmittel“ entscheiden, ob die Verhandlung erfolgreich oder erfolglos abgeschlossen wird [Bild 66](#).
3. Bieten: Der Ablauf des Bietens gestaltet sich ähnlich dem Anfragen. Zunächst wird ein Verhandlungswert verschickt und auf dessen Annahme oder Ablehnung gewartet. Im Fall einer Annahme wird der in der Annahme enthaltene Verhandlungswert geprüft und entweder abgelehnt oder angenommen.

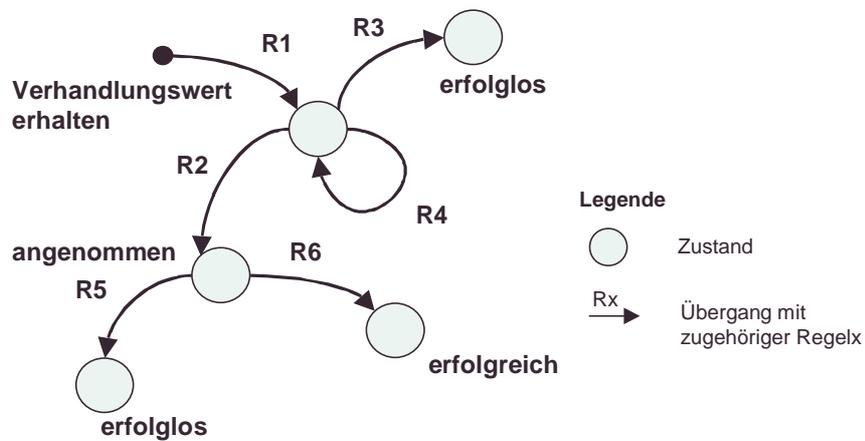


Bild 66: Anfrage

Regel:	WENN-Teil	DANN-Teil
R1	START ERHALTEN Nachricht „Verhandlungswert“	„Verhandlungswert erhalten“
R2	„Verhandlungswert erhalten“ UND „Verhandlungswert annehmen“	„Verhandlungswert angenommen“; SENDE Nachricht „Verhandlungswert angenommen“ zum Anfragenden
R3	„Verhandlungswert erhalten“ UND „Verhandlungswert abgelehnt“	„erfolglos“ SENDE Nachricht „Verhandlungswert abgelehnt“ zum Anfragenden
R4	„Verhandlungswert angenommen“ UND ERHALTEN Nachricht „Verhandlungswert angelehnt“ vom Bietenden	„erfolglos“
R5	Verhandlungswert angenommen“ UND ERHALTEN Nachricht „Verhandlungswert angenommen“ vom Bietenden	„erfolgreich“

Tabelle 9: Konversationsregeln für den Anfragenden

Klassenhierarchie

Die Fähigkeit Nachrichten zu versenden und zu erhalten wird über HLA realisiert. Eingehende Nachrichten werden in eine Nachrichtenqueue eingetragen. Der Nachrichtenparser hilft die Inhalte der Nachrichten aufzuschlüsseln. Verbraucher, Ressourcen, und Broker erben von der Klasse „Agent“. Diese Klasse besitzt die Konversationsklassen Verhandlungswert sowie Vermitteln, Verhandlungsschema, Anfrage und Bieten (Bild 67). Eine Konversation besteht aus verschiedenen Regeln. Hierfür sei auf die Kapitel 5.2.4.1 und den vorhergehenden Abschnitt verwiesen.

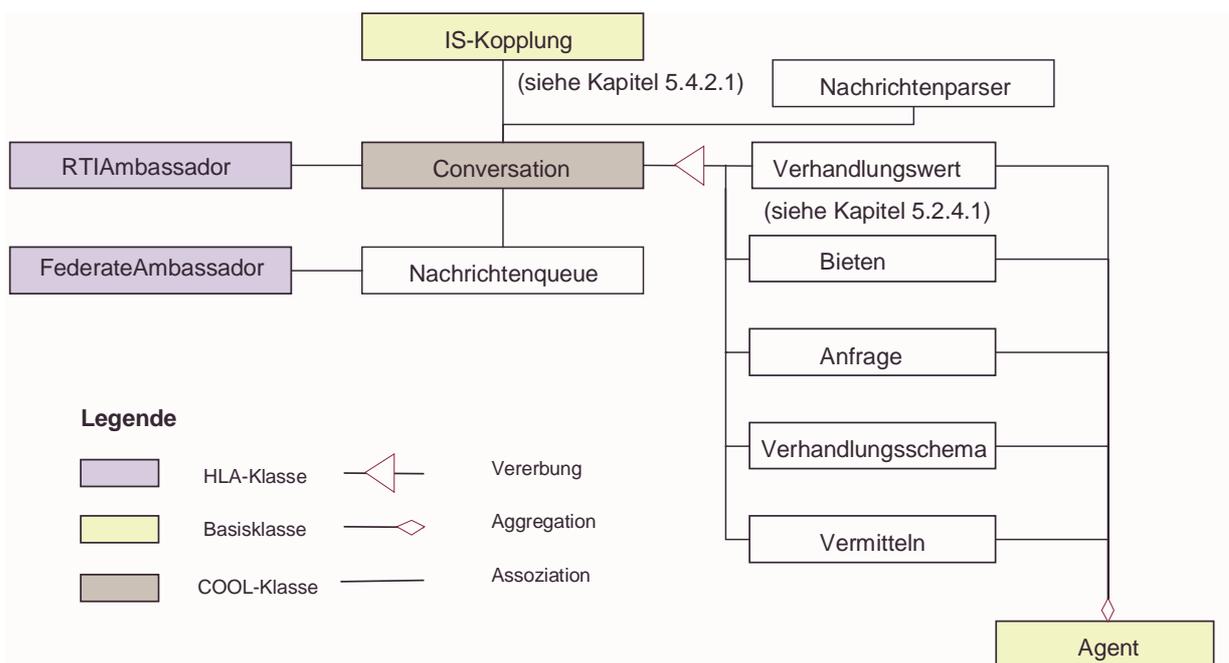


Bild 67: Klassenhierarchie für Verbraucher und Ressourcen

5.4.2.4 Vorgehensweise

Die genannten Klassen gehören zu einem Kommunikationsmodul, das vom Simulationssystem genutzt wird. Das jeweilige Simulationsmodell legt fest, welche Funktionen des Kommunikationsmoduls genutzt werden. Dafür müssen vor einem Simulationslauf die Nachrichten „Kenndaten“ festgelegt werden, über die während der Simulation andere Simulations- und Experimentiersysteme informiert werden sollen. Beobachter setzen zudem vor einem Simulationslauf die Faktordaten. Beispielsweise können Kenndaten eines Hochregallagers auf folgende Weise veröffentlicht werden:

```
newLager („Hochregallager“)
```

```
newMaterial („Hochregallager“, „Karosserien“)
```

Während eines Simulationslaufes wird jeder Lagerein- beziehungsweise -abgang mitprotokolliert. Dafür ruft das Simulationssystem folgende Funktionen auf:

addMaterial („Hochregallager“, „Karosserien“, „1“ /* Menge */)

removeMaterial („Hochregallager“, „Karosserien“, „1“ /* Menge */)

Mit den gegebenen Beispielfunktionen können Beobachter den Bestandsverlauf im Hochregallager nachvollziehen. Weitere Funktionen stehen zur Verfügung, mit denen die anderen Kenngrößen eines Lagers beziehungsweise die Kenngrößen eines Auftrags, Transports, einer Fertigung und Montage verändert werden können. Auf die gleiche Weise werden Nachrichten für Material, Transportmittel und Auftrag gesetzt.

Die Veränderungen im Kommunikationsmodul werden dem Simulationssystem in der Ereignisschleife aus Bild 64 übermittelt. Beispielsweise beantragt das Simulationssystem „Transportunternehmer“ beim Simulationssystem „Zulieferant“ das Löschen der Nachricht „Material“, wenn es bereit ist, das Material zu übernehmen. Dieses Ereignis löst dann im Simulationssystem „Zulieferant“ die Auslagerung des Materials aus. Danach erhält das Simulationssystem „Transportunternehmer“ die Erlaubnis die Nachricht „Material“ zu löschen. Das Kommunikationsmodul stellt dem Simulationssystem hierbei das Ereignis und die dazugehörige Nachricht „Material“ zur Verfügung und erhält nach der Auslagerung die Information, daß dem Simulationssystem „Transportunternehmer“ die Erlaubnis zum Löschen gegeben werden kann.

Folgende Vorgehensweise ist daraus abzuleiten:

1. Auswahl der beteiligten Subsysteme: Zu Beginn werden die Subsysteme des Materialversorgungsprozesses ausgewählt. Hierfür ist festzulegen, wie viele Beobachter an der Simulation teilnehmen, welche Simulationssysteme beteiligt sind und welche Steuerung dem Versorgungsprozeß zugrunde liegt. Die Minimalkonfiguration besteht aus einem Verbraucher, einer Ressource und einem Beobachter.
2. Validieren des Modellnetzes: Das Validieren des Netzes beinhaltet die üblichen Methoden der Simulation, wie z. B. eine Sichtprüfung. Dabei geht es vor allem darum, daß die Modellgrenzen aller Simulationsmodelle des Gesamtnetzes zu einander passen. Eine Sichtprüfung kann zeigen, in welchem Simulationssystem es zu Stauungen kommt, da das Material nicht wie eigentlich geplant von einem anderen Simulationssystem weiterverarbeitet wird.
3. Einigung über die Faktoren: Zwischen den Beobachtern muß sich über die zu untersuchenden Faktoren geeinigt werden. Die Einigung erfolgt über direkte Kommunikation, indem Nachrichten über Faktoren ausgetauscht werden. Es macht Sinn, Faktoren aus

der Erfahrung heraus in wichtige und unwichtige zu sortieren, da viele Faktoren die Anzahl der Experimente sehr stark erhöhen.

4. Aufstellen des Versuchsplans: Nachdem sich über die Faktoren geeinigt wurde, kann der Versuchsplan aufgestellt werden und die Durchführung der Experimente geplant werden.
5. Durchführen und Auswerten der Experimente: Nach den erfolgten Schritten 1 bis 4 können die Experimente gestartet werden. Diese Schritte können sich gegebenenfalls wiederholen, wenn man mit dem Ergebnis der Experimente nicht zufrieden ist.

6 Beispiel der Nutzung in der Automobilindustrie

6.1 Ausgangssituation

In der Automobilindustrie ist der Materialversorgungsprozeß für die Finalmontage ein entscheidender Kostenfaktor. Die konsequente Umsetzung der Just-In-Time Philosophie ist ein Weg, Kosten im Materialversorgungsprozeß einzusparen. Just-In-Time wird hier definiert als stundengenaue Materialversorgung, die bedarfsorientiert auf einer festen Montagesequenz beruht. Für diese Art der Materialversorgung eignen sich nur Systeme, Module bzw. Teile, deren Zeitrahmen, d.h. Pulken, Transport und JIT-Puffer in der Summe nicht den Zeitrahmen der festgelegten Montagesequenz überschreiten (Bild 68). Das Pulken bezeichnet im Fahrzeugbau das Zusammenstellen von Lieferabrufen.

Da die Annahme einer 100% stabilen Montagesequenz nicht haltbar ist, muß der minimale Just-In-Time Puffer entsprechend den erwarteten Störungen ausgelegt werden. Die Zeit bis zum Verbau der Teile ergibt sich aus der Summe der Bestellzeit, Wiederbeschaffungszeit und dem minimalen Puffer (Sicherheitsbestand). Durch diese Rechnung kann eine minimale, maximale und durchschnittliche Pufferzeit gebildet werden (Tabelle 10).

Aus Sicht der Finalmontage ergeben sich folgende Ziele. Der maximale Puffer ist verantwortlich für den Platzbedarf, der an der Montageline zur Verfügung gestellt werden muß. In dem Fall, wenn die Summe der Platzflächen für die Teilefamilien größer ist als der eigent-

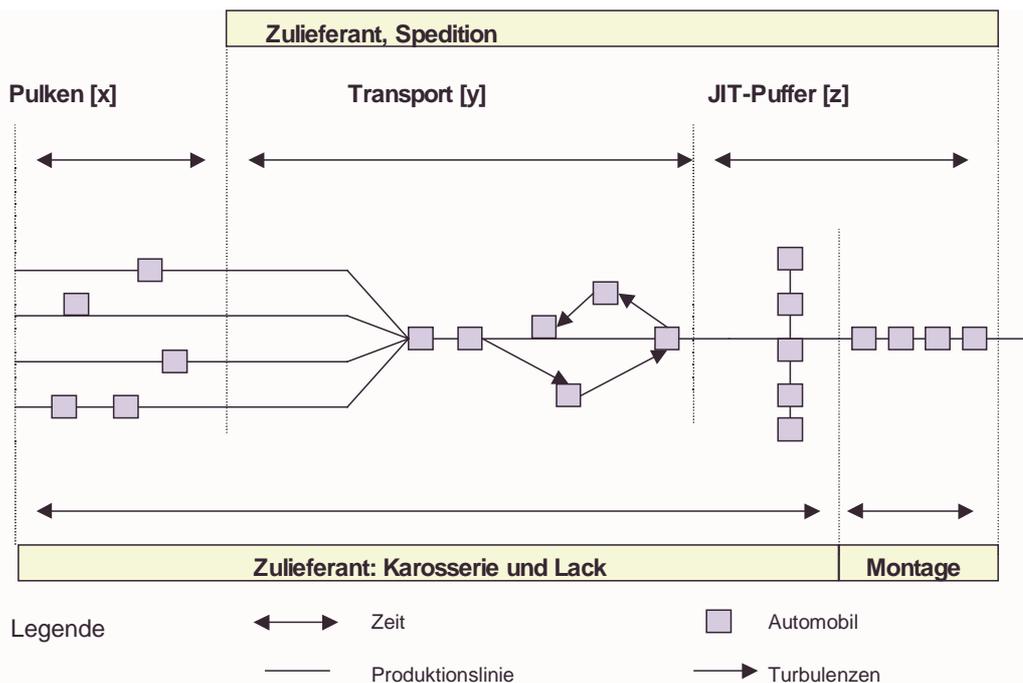


Bild 68: Materialversorgungsprozeß der Finalmontage /53/

Wiederbeschaffungszeit [h]		Verbleibende Zeit zum Verbau [h]		Puffer:	
Pulken	x	x		T_{PMIN}	$= T_{vzv} - T_{wbz} = z$
Transport	y	u	Karosserie und Lack	T_{PMAX}	$= T_{PMIN} + x$
		v	Montage	T_{PD}	$= (T_{PMAX} + T_{PMIN}) * 0,5$
Summe	T_{wbz}	T_{vzv}		T_{PMIN}	Minimale Pufferzeit
				T_{PMAX}	Maximale Pufferzeit
				T_{PD}	Durchschnittliche Pufferzeit

Tabelle 10: Bildung des minimalen, maximalen und durchschnittlichen Puffers

lich zur Verfügung stehende Platz, müssen Teile zusätzlich zwischengelagert werden. Dadurch entstehen extra Kosten durch zusätzlichen Transport und Lagerhaltung. Der Flächenengpaß verhindert hier eine Erweiterung der Just-In-Time Teile. Zwei wesentliche Faktoren bestimmen den Flächenbedarf in der Montage: die Dauer des Pulkens, die für das Transportvolumen steht, und die Größe des minimalen Just-In-Time Puffers, der in direkter Korrelation zur Stabilität der Montagesequenz steht (Tabelle 10).

Aus Sicht des Transportunternehmers erheben sich die folgenden Sachzwänge: Da zur Zeit ein Lkw Komponenten von genau einem Zulieferanten zur Finalmontage bringt und Transportkapazität voll ausgeschöpft wird, entspricht das Liefervolumen einem vielfachen des minimalen Puffers. Folglich ist der maximale Puffer zu hoch und der Anteil Just-In-Time Teile niedrig. Um die Just-in-Time Anteile zu erhöhen, muß also die Frequenz der Versorgung erhöht und dadurch die Dauer des Pulkens verringert werden. Allerdings würde dies zu einer sub-optimalen Nutzung der Fahrzeuge führen, wenn der Transportunternehmer eine „reine“ Materialversorgung beibehalten würden. Durch die Bündelung von Zulieferanten zu einer Fahrzeuglinie wird die Erhöhung der Versorgungsfrequenz und damit eine Reduzierung der maximalen Lagerflächen möglich. Es zeigt sich, daß eine Erhöhung der Anlieferfrequenzen nicht unbedingt zu einer Erhöhung der Transportkapazitäten führen muß, wenn die zusätzlichen Transportwege klein gehalten werden. Es ist also zum Vorteil, Zulieferanten mit räumlicher Nähe zu einem Transportunternehmer zu bündeln, um die Transportwege klein zu halten.

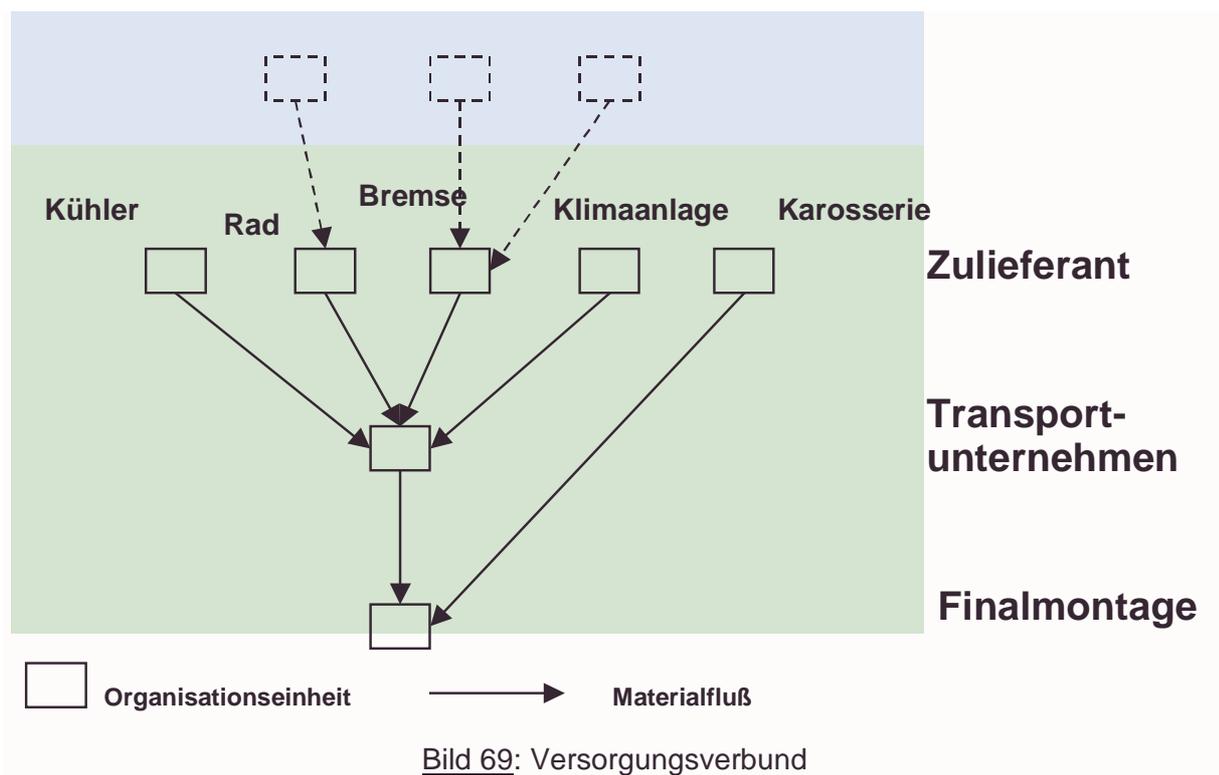
Aus Sicht der Zulieferanten bedeutet das, kleinere Mengen an Material als bisher zur Verfügung zu stellen. Dadurch können die Zulieferanten eine Reduzierung der Lager erreichen. Allerdings führen Turbulenzen in der Montagesequenz dazu, daß die Produktionsmenge der Varianten und das Transportvolumen täglichen Schwankungen unterworfen ist. Diese Schwankungen erfordern eine geeignete Reaktion sowohl auf der Seite des Transportunternehmers als auch auf der Seite der Zulieferanten. Die Zulieferanten stehen vor der Wahl, diese Schwankungen durch Lager oder durch flexible Fertigungssysteme auszugleichen.

Der Transportunternehmer kann auf Ressourcen anderer Transportunternehmer zurückgreifen, wenn Rahmenverträge dieses erlauben.

Zu dem betrachteten Versorgungsverbund gehören Zulieferanten der Komponenten Kühler, Rad, Bremse und Klimaanlage. Bild 69 zeigt die Partner im Versorgungsverbund. Das Produktionsprogramm sieht vor, 500 Produkte pro Tag zu montieren. Es wird ein sich dynamisch veränderndes Umfeld angenommen. Zu diesen Veränderungen soll gehören, daß

- (a) Teile der Ladung durch andere Lkw befördert werden,
- (b) Bedarfsschwankungen in der Abrufmenge von 100 Stück pro Tag in der Montage,
- (c) Störungen bei Zulieferanten und
- (d) Ausfälle von Lkws.

Für diese Veränderungen soll das Materialversorgungssystem ausgelegt werden.

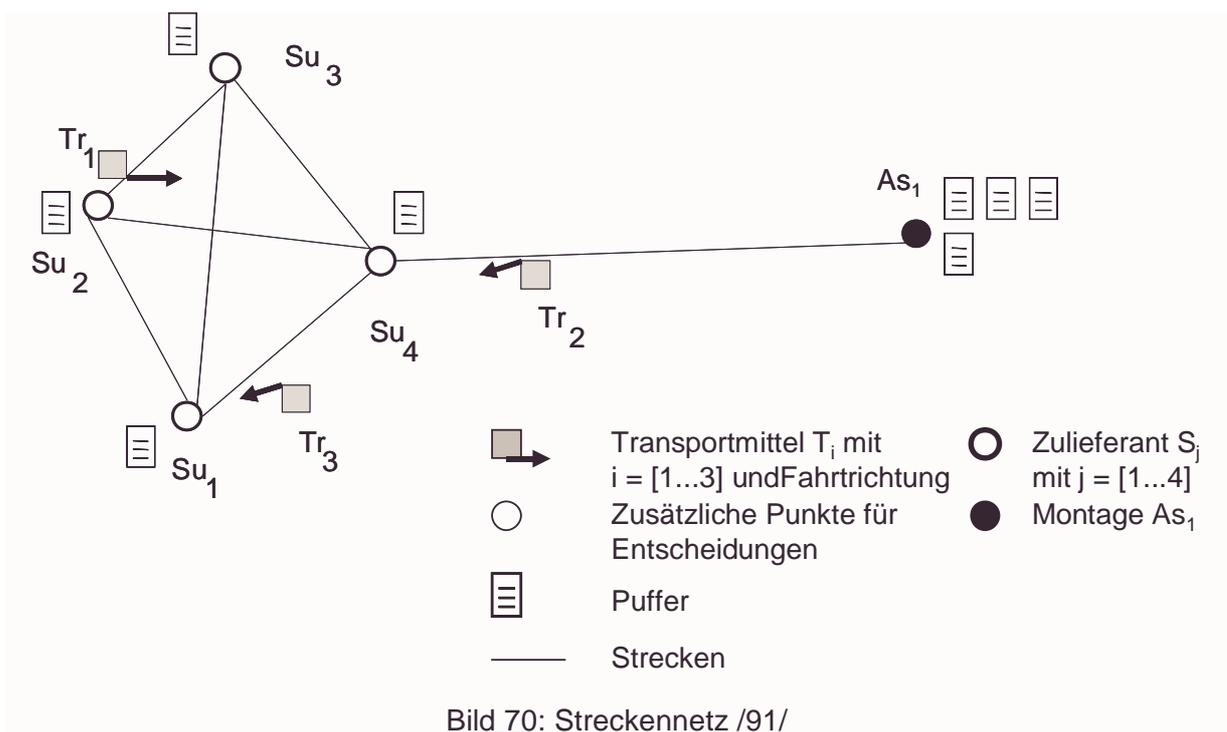


6.2 Simulation

6.2.1 Subsysteme und deren Kopplung

Zunächst sollen die Subsysteme des Versorgungsprozesses vorgestellt werden. Die verteilte Simulation des Verbundes setzt sich aus folgenden Subsystemen zusammen:

- **Transport:** Bild 70 zeigt die Verknüpfung von Zulieferanten, Finalmontage und Transportunternehmer über ein Transportsystem. Umgesetzt wurde dieses Streckenmodell mit dem Simulationssystem AUTOMOD.
- **Fertigung bzw. Lager:** An den Orten Su_1 bis Su_4 befinden sich die Simulationssysteme der Zulieferanten. Die einzelnen Komponenten können beispielsweise aus einem Hochregallager entnommen, vorkommissioniert und dann durch das angekoppelte Simulationssystem „Transportunternehmer“ zum Simulationssystem „Finalmontage“ gebracht werden. Eine Implementierung erfolgte in AUTOMOD bzw. SLX.
- **Finalmontage:** Am Ort As_1 befindet sich das Simulationssystem der Finalmontage. Auf einem Montagesystem sollen Automobile montiert werden. Der Versorgungsverbund enthält nur einen kleinen Ausschnitt an Komponenten, die geliefert werden. Dazu sind der Kühler, die Bremse, die Klimaanlage in das Gehäuse einzusetzen und zum Schluß die Räder zu montieren. Das Modell wurde in AUTOMOD implementiert.
- **Transportmittel:** Lkws sollen je nach Bedarf gesteuert werden, daß alle Termine eingehalten und die Auslastung der Lkw am besten ist. Hierfür sollen Steuerungsregeln entworfen werden, welche ebenso wie die Kommunikationsregeln im Transportsystem



hinterlegt sind.

6.2.2 Internet - Performance

6.2.2.1 Implementierung

Für die Kopplung der Systeme ergibt sich Bild 71, welches die Systeme der Zulieferanten, des Transportunternehmers und der Finalmontage enthält. Zu den genutzten Klassen des Informationssystems gehören (siehe Abschnitt 5.2.3):

- Lagerobjekte mit der für dieses Beispiel genutzten Kenngröße Bestand,
- Auftragsobjekte mit den Eigenschaften Durchlaufzeit und Termin und
- Transportmittel mit den Eigenschaften Stillstandszeit, Leerfahrt und Lastfahrtzeit zur Berechnung der Auslastung der Lkw.

Es erfolgt eine ressourcenorientierte Verhandlungsstrategie. Das bedeutet, daß die Lkws

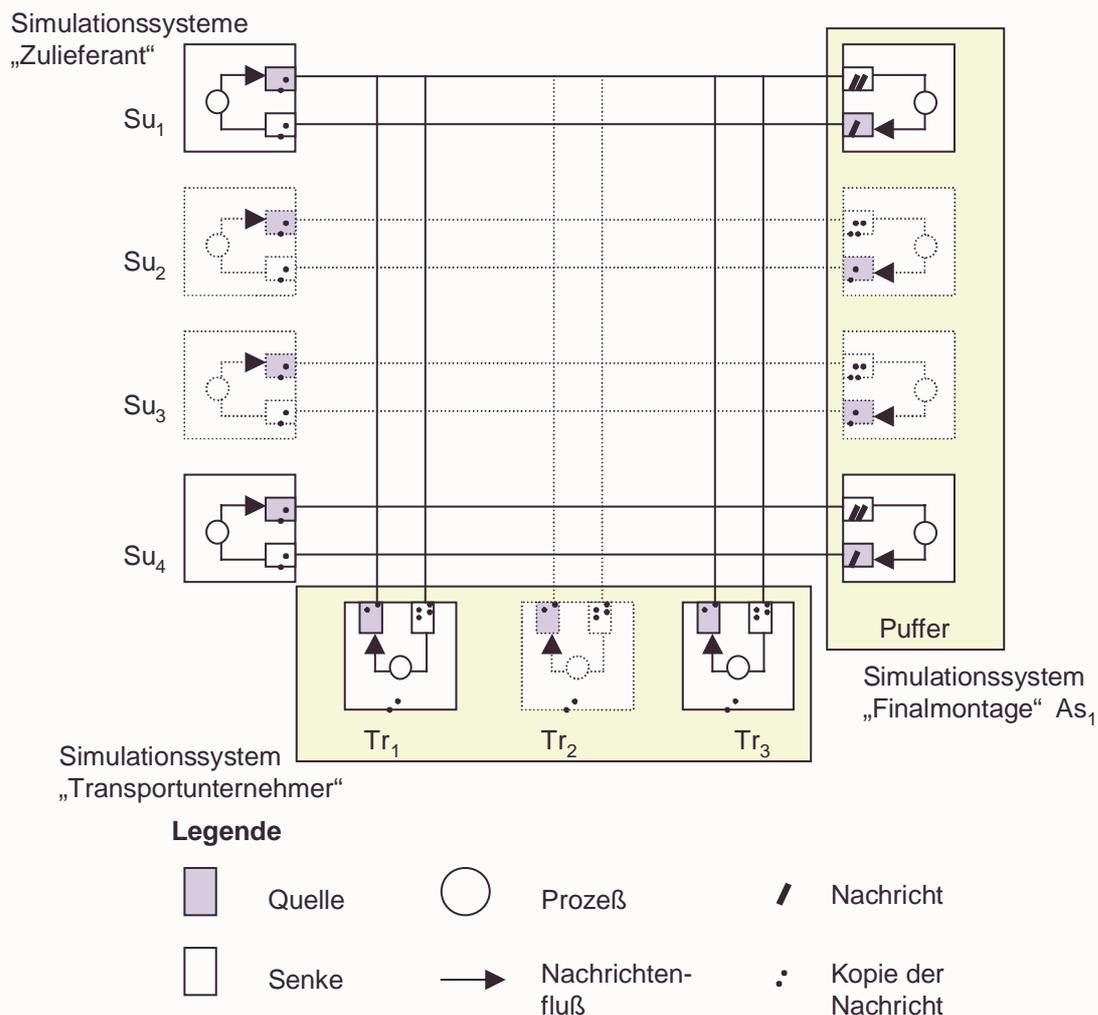


Bild 71: Ausführungssystem

des Transportunternehmers die Verhandlungen eröffnen und bei den Zulieferanten nach Aufträgen fragen. Erhält ein Lkw einen Zuschlag, so fährt er zum Zulieferanten und nimmt die Komponenten mit. Erst wenn der Lkw am Ort des Zulieferanten ist, wird eine Nachricht über das Material an den Lkw geschickt.

Für die Performancemessung im Internet wird zunächst eine einfache Kopplung realisiert, da hier eine Kopplung des Ausführungssystems ausreicht. Getestet wird die Kopplung für die Klimaanlage mit drei Varianten, wobei erstens eine Kopplung zwischen dem Simulationssystem „Zulieferant“ und dem Simulationssystem „Finalmontage“ und zweitens eine Kopplung zwischen allen drei Systemen „Zulieferant“, „Finalmontage“ und „Transportunternehmer“ aufgebaut werden soll.

Jedes Simulationssystem hat einen eindeutigen Namen in der Simulationsanordnung, über den durch das Attribut „Adresse“ bzw. „Absender“ in den Nachrichtentypen das Versenden der Nachrichten an das richtige Simulationssystem sichergestellt wird. Zur Implementierung wird auf die Klassen aus dem Kapitel 5.4.2 zurückgegriffen. Für die Untersuchung werden die Zeitsteuerung, die AS-Kopplung und die Materialdaten-Klasse verwendet. Die Materialdaten-Klasse gibt es in zwei Ausprägungen „leerer Behälter“ und „voller Behälter“.

Jedes Simulationssystem wartet auf Nachrichten über Bedarfe im Sender des vorherigen Simulationssystems. Liegt eine Nachricht vor, wird mit der Abarbeitung begonnen. Für die Lkws bedeutet dies, daß sie Behälter von der Finalmontage aufnehmen und zum Zulieferanten transportieren. Das gleiche gilt, wenn im Sender des Zulieferanten ein voller Behälter bereitsteht.

Jeder Empfänger soll nur über die Behälter informiert werden, die an ihn gerichtet sind. Im Modell mit drei Simulationssystemen werden alle drei Modelle von der RTI über die Klasse Material benachrichtigt. Damit das Simulationssystem „Zulieferant“ nicht die Nachrichten verarbeitet, die an das Simulationssystem „Transportunternehmer“ gerichtet sind, wird das Attribut „Absender“ und „Transport“ als Auswahlkriterium genommen. Die Finalmontage schickt somit Nachrichten an den Zulieferanten und der an die Finalmontage. Der Transportunternehmer schaltet sich in diese Kommunikation ein, indem er Nachrichten mit dem Absender „Finalmontage“ und „Zulieferant“ verarbeitet und diese Nachrichten an den Absender weiterleitet.

Intern ergibt sich die Darstellung aus Bild 72. Die Teilnehmer veröffentlichen (*publish*) und abonnieren (*subscribe*) die Klasse Material. Die Simulation beginnt erst, wenn für alle Nachrichten ein Empfänger der sogenannten Federation beigetreten ist. Um einen Behälter zu senden, muß ein Simulationssystem ein Objekt in den Sender eintragen. Das geschieht mit der Funktion „setMaterial (...)“. Beispielsweise benutzt das Simulationssystem „Finalmontage“ folgenden Aufruf der Funktion:

```
setMaterial („leerer Behälter“ /*Typ*/, 1 /*Menge*/,
„Transportunternehmer“ /*Transport*/, „Zulieferant“ /*Adresse*/).
```

Der Empfänger des Simulationssystems „Transportunternehmer“ erhält über den RTI alle Informationen zu dieser Nachricht. Hierfür trägt die Controller-Klasse des RTI ein Materialobjekt in den Empfänger vom Simulationssystem „Transportunternehmer“ ein. Über dieses Objekt erhält das Simulationssystem „Transportunternehmer“ die oben angegebenen Werte. Ein Lkw des Transportunternehmers fährt zum Absender der Nachricht und nimmt den leeren Behälter entgegen. Dieses Ereignis wird durch das Entfernen des Materialobjektes im Empfänger des Simulationssystems „Transportunternehmer“ angestoßen. Das Simulationssystem „Finalmontage“ erfährt darüber von der RTI, die das Entfernen als ein externes Ereignis weitergibt.

In HLA wird zwischen externen und internen Objekten bzw. zwischen der Nachricht und deren Kopie unterschieden. Externe Objekte sind Objekte, die nicht innerhalb des eigenen Subsystems erzeugt wurden. Der Behälter wird beispielsweise vom Simulationssystem „Finalmontage“ erzeugt, somit ist dieses Objekt ein internes Objekt in der Montage. Der Pfeil

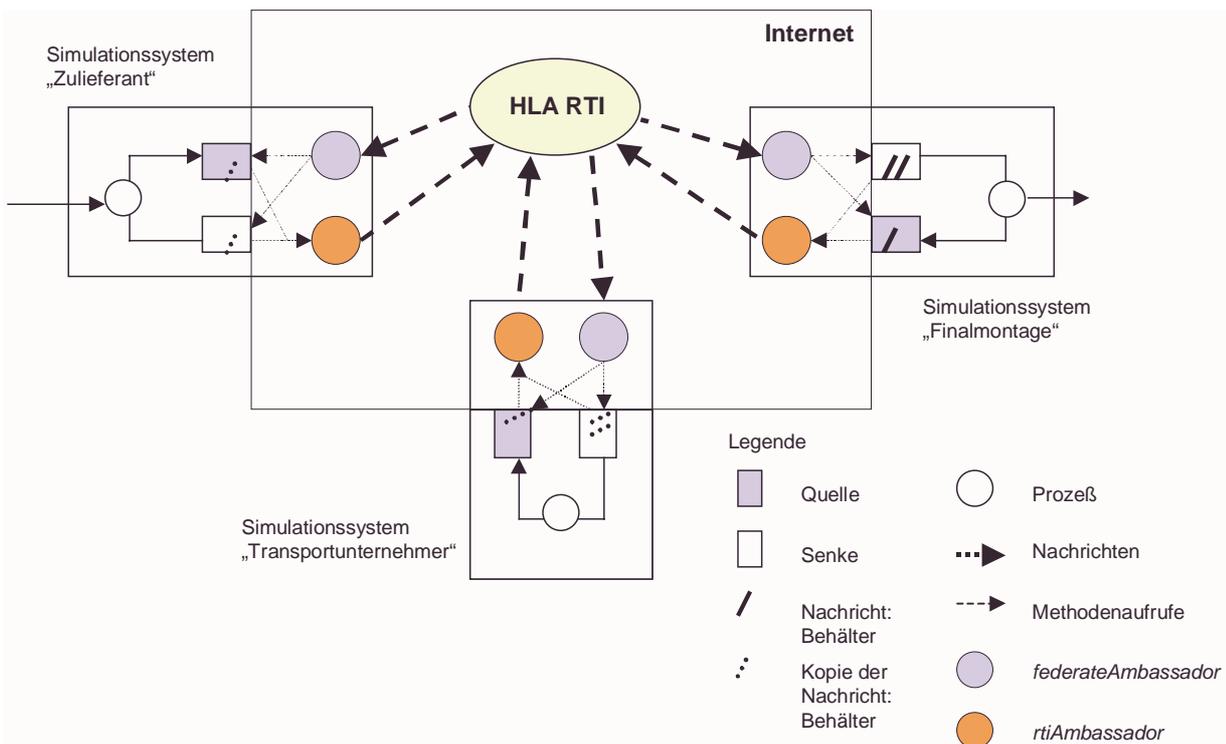


Bild 72: Kopplungsmodell in HLA

zum RTI zeigt an, daß Änderungen oder neue Objekte von der View-Klasse, *rtiAmbassador*, weitergegeben werden (Bild 72). Im Gegensatz dazu bedeutet der Pfeil zur Controller-Klasse, *federateAmbassador*, daß Informationen über neue Objekte und deren Änderungen über das RTI bekanntgegeben werden. Diese sind dann in den anderen Simulationssystemen als Kopien, d.h. externe Objekte, vorhanden.

Neben dem Austausch von Objektinformationen, mit deren Hilfe der Materialfluß und dessen Steuerung abgebildet wird, sind die Zeitpunkte solcher Informationen in einer verteilten Simulation wichtig. Die Teilmodelle liegen teilweise im Simulationssystem AUTOMOD vor. AUTOMOD gehört zu der Gruppe von Simulationssystemen mit geschlossenen Ereignislisten, die eine Integration externer Ereignisse nicht ohne weiteres erlauben. Wäre ein Eingriff in die Ereignisliste möglich, könnte ein *NextEventRequest* mit dem Zeitpunkt des nächsten lokalen Ereignisses an den RTI geschickt werden. Da man jedoch nicht in der Lage ist, die Zeit des nächsten lokalen Ereignisses zu bestimmen, wird der *NextEventRequest* mit der Zeit bis zu einem virtuellen nächsten Ereignis verwendet. So kann die Verarbeitung, wie in Bild 64 gezeigt, fortgesetzt werden. Synchronisiert wird so in Intervallen von t_{lokal} Zeiteinheiten. Bild 73 zeigt den Algorithmus.

Da dieser Algorithmus als eigener Prozeß in AUTOMOD implementiert werden muß, sind zusätzlich *wait*-Befehle notwendig, um anderen Prozessen die Verarbeitung von Ereignissen zu ermöglichen. Diese Prozesse dürfen während des Zeitabschnitts $t_{\text{lokal}} - t_0$ beziehungsweise $t_{\text{grant}} - t_0$ lokale Ereignisse verarbeiten. Bei t_0 handelt es sich dabei um den aktuellen Zeitpunkt im Zeitablauf der Simulation. Leider führt dieser Ansatz zu Ungenauigkeiten in der Simulation. Große Werte für T_{lokal} verkürzen zwar die Laufzeit, aber gleichzeitig wachsen die Ungenauigkeiten der Simulationsergebnisse.

```

While (simulation still in pogress) do
  tlokal = next virtual event
  tgrant = nextEventRequest( tlokal )
  if ( tgrant < tlokal ) then
    /* wait for ( tgrant - t0 ) */
    /* get orders from the federation */
  else
    /* wait for ( tlokal - t0 ) */
    /* set orders to the federation */
  end if
End while

```

Bild 73: Algorithmus zur Integration externer Ereignisse

6.2.2.2 Zielsetzung und Faktoren

Es ist offensichtlich, daß eine verteilte Simulationsanordnung die Geschwindigkeit oder Leistung der Simulation verbessern kann. Dennoch gilt zu bedenken, daß kommerzielle Simulatoren verwendet werden und eine Verteilung der Modelle zugrunde liegt, die vom Anwendungsfall herkommt und nicht unter Geschwindigkeitskriterien gemacht wurde. Ein Hauptfokus der Tests lag darin, den Einfluß des Internets zu messen.

Für die Leistungsbeurteilungen wird eine vereinfachte, weiter oben beschriebene Modellkonfiguration verwendet, die es erlaubt, Tests mit zwei und drei Federates durchzuführen. Die Federates haben die folgenden Aufgaben:

- **Federate A:** Zulieferant
- **Federate B:** Transportunternehmer
- **Federate C:** Finalproduzent

Über die Zeitsteuerung der Simulation kann der sogenannte *Lookahead* eingestellt werden. Dieser Wert ermöglicht einen hohen Grad an paralleler Verarbeitung. In HLA kann dies durch große Werte des *Lookheads* erreicht werden. Ein weiterer entscheidender Faktor ist die Komplexität der Berechnung, die durch zusätzliche Warteanweisungen erhöht wird. Kommunikation bezieht sich in diesem System darauf, wie häufig Behälter weitergegeben werden.

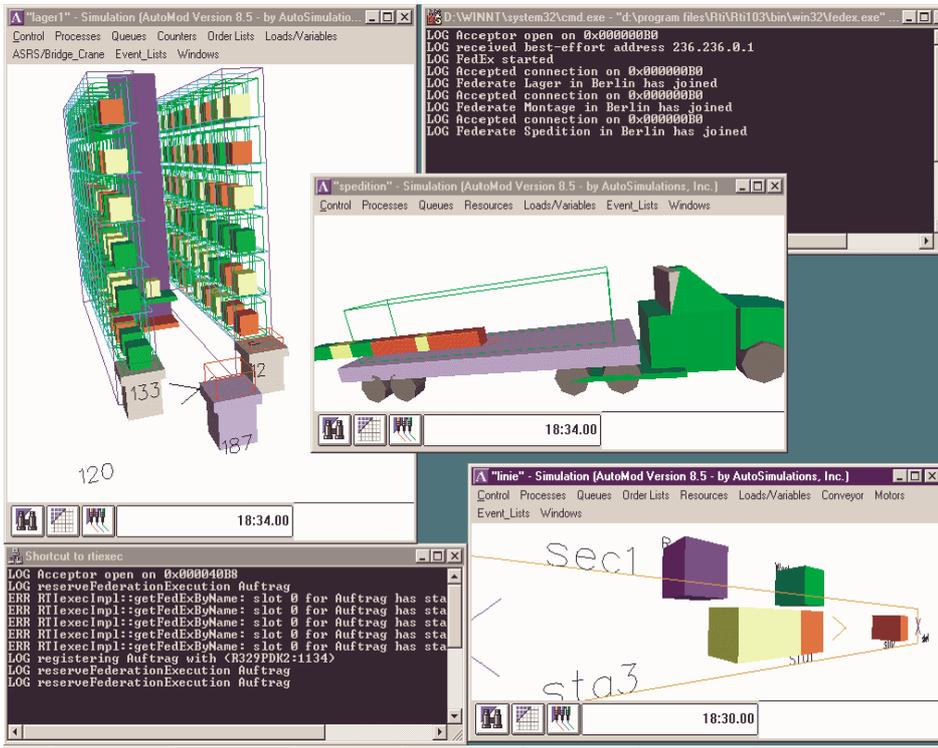
Um die Wirkung des Internets beurteilen zu können, sind Referenzversuche notwendig. Dazu gehört ein sogenanntes *All-In-One-Model*, für das nur die Komplexität als Faktor variiert wurde. Die Ergebnisse liegen bei 480sec für die Einstellstufe (-) und 960sec für die Einstellung (+), was den Erwartungen entspricht. In Tabelle 11 sind die Werte der verschiedenen Faktoren und deren Variation während der Tests enthalten.

6.2.2.3 Ergebnisse

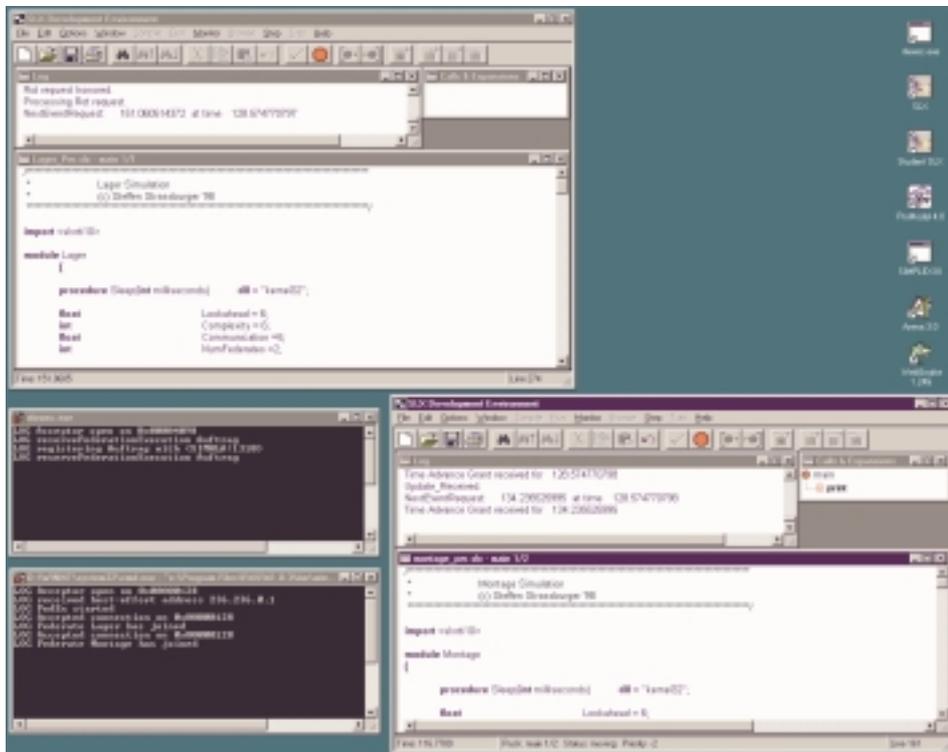
In der ersten Testumgebung wird ein Pentium 120 Computer mit 64 MB Hauptspeicher mit Windows NT 4.0 und das DMSO RTI 1.0.3 verwendet. Die gesamte Federation wurde auf einem einzelnen Computer ausgeführt. Bild 74 zeigt die Testumgebung. Für die Leistungsbeurteilungen wurden alle visuellen Ausgaben (AUTOMOD) ausgeschaltet. Es zeigt sich insgesamt ein deutlich besseres Laufzeitverhalten als bei den Referenzversuchen.

Lookahead (Zeit- einheiten)	Komplexität (reale Zeitein- heiten)	Federates (Anzahl)	Kommunikation (Aufträge pro 100 Zeit- einheiten)	Simula- tions- system (Typ)	Laufzeit (sec)
0	1	2	5	Open	33
0	1	2	5	Closed	90
0	1	2	20	Open	158
0	1	2	20	Closed	140
0	6	2	5	Open	169
0	6	2	5	Closed	497
0	6	2	20	Open	833
0	6	2	20	Closed	569
6	1	2	5	Open	23
6	1	2	5	Closed	90
6	1	2	20	Open	96
6	1	2	20	Closed	140
6	6	2	5	Open	106
6	6	2	5	Closed	497
6	6	2	20	Open	529
6	6	2	20	Closed	569
0	1	3	5	Open	50
0	1	3	5	Closed	96
0	1	3	20	Open	182
0	1	3	20	Closed	145
0	6	3	5	Open	243
0	6	3	5	Closed	501
0	6	3	20	Open	840
0	6	3	20	Closed	640
6	1	3	5	Open	46
6	1	3	5	Closed	120
6	1	3	20	Open	103
6	1	3	20	Closed	119
6	6	3	5	Open	211
6	6	3	5	Closed	497
6	6	3	20	Open	565
6	6	3	20	Closed	517

Tabelle 11: Ergebnisse der Tests (1)



3 Automod-Federates with *rtiexec-* and *fedex-*process



2 SLX federates with *rtiexec-* and *fedex-*process

Bild 74: Bildschirmansichten zweier Versuchsanordnungen /93/

Mit dem zweiten Test sollte die Wirkung des Internets gemessen werden. Ein Computer wurde für den *Rtiexec*- und den *Fedex*-Prozeß verwendet. Die Federates wurden auf anderen Computern gestartet, wobei sowohl AUTOMOD als auch SLX in einer Federation genutzt wurden. Da die Anzahl der Federates keine Wirkung im aufgestellten ersten Test hatte, wurden nur Versuche bezüglich Komplexität, Lookahead und Kommunikation durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 12 aufgeführt.

Ein Vergleich beider Tabellen zeigt leicht unterschiedliche Ergebnisse. Ein hoher Kommunikationsaufwand führt zu einer besserer Leistung im Internet (Tabelle 12), als auf einem einzelnen Computer (Tabelle 11), während ein niedriger Kommunikationsaufwand kaum Auswirkungen auf die Ergebnisse hat. Dies muß auf die Kombination beider Simulatoren in einer Federation im Internet zurückgeführt werden. Das Internet ist kein Engpaß.

Lookahead (Zeit- einheiten)	Komplexität (reale Zeit- einheiten)	Kommunikation (Material pro 100 Zeiteinheiten)	Simulations- system (Typ)	Laufzeit (sec)
0	1	5	Mixed	66
0	1	20	Mixed	91
0	6	5	Mixed	316
0	6	20	Mixed	360
6	1	5	Mixed	49
6	1	20	Mixed	62
6	6	5	Mixed	261
6	6	20	Mixed	302

Tabelle 12: Ergebnisse der Tests (2)

6.2.3 Potential des Verhandlungsschemas

Nach erfolgtem Internetttest soll die einfache Kopplung durch eine Agentensteuerung erweitert werden. Hierzu wurde das Verhandlungsschema umgesetzt. Bild 75 zeigt einen Ausschnitt aus den Verhandlungen der Lkw mit den Zulieferanten um volle Behälter, die zu der Finalmontage gebracht werden sollen. Faktoren auf die Produktivität des Systems sind die fuzzy-logischen Regeln, mit denen die Lkws gesteuert werden. Für den Entwurf der Regeln werden die Zeit bis zum Verbau in der Finalmontage (A), der Bestand des Lagers beim Zulieferanten (S) sowie die Fahrzeiten der Lkw (T) herangezogen. Vier Abstufungen in zu früh, früh, genau und zu spät bzw. leer, wenig, gerade recht und voll führen dann zu insgesamt

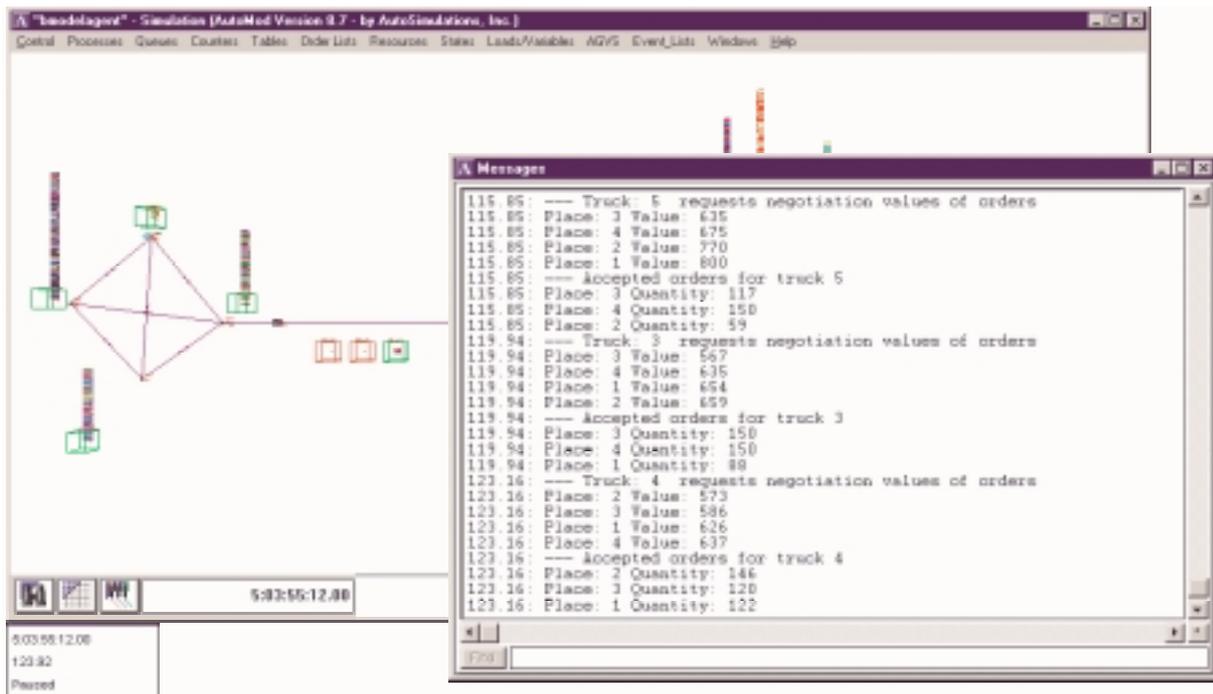


Bild 75: Bildschirmansicht der Simulation

12 Regeln für jeden Transportauftrag bei den Zulieferanten. Eine eingehende Betrachtung der Regeln und deren Auswertung findet sich in Abschnitt 5.2.4.

Die Vorgehensweise ist wie folgt: Die Lkws werden zunächst mit einem initialen Dispositionsplan ausgestattet. In einen solchen Plan werden Transportaufträge und Fahrzeuge zugeordnet. Geht man von einer festen Pulkungszeit und von einem konstanten Bedarf in der Montage aus, dann reduziert sich das Problem auf eine Zuordnung der Zuliefermengen auf Lkw ohne zeitliche Anpassungen.

Ein Programm, das diese Zuordnung festlegt, könnte wie folgt bestimmt werden. Sei f_j die Versorgungshäufigkeit und b_j das zu transportierende Volumen der Teilefamilie j pro Zeiteinheit, dann ist b_j/f_j das Volumen der Teilefamilie j pro Fahrzeug. Jedes Fahrzeug i hat die Kapazität von 1. Die freie Kapazität c_i pro Fahrzeug kann dann mit folgender Gleichung ausgedrückt werden:

$$c_i = 1 - \sum_{j=1}^m u_{ij} \cdot \frac{b_j}{f_j}, \quad \forall i = 1 \dots n \quad (1)$$

wobei n die Anzahl der Fahrzeuge, m Anzahl der Teilefamilien und u_{ij} eine binäre Variable, die anzeigt, ob die Ladung b_j/f_j der Teilefamilie j auf dem Fahrzeug i transportiert wird oder nicht. Die Nebenbedingung lautet wie folgt:

$$\sum_{j=1}^m u_{ij} = f_j, \quad \forall i = 1 \dots n \quad (2)$$

Dadurch wird sichergestellt, daß alle Ladungen, nicht mehr und nicht weniger, transportiert werden. Durch Variation von u_{ij} und n kann für gegebene Teilefamilien und Versorgungsfrequenzen Werte die Belegung der Fahrzeuge berechnet werden. Ziel ist es, eine mög-

	Lkw	1		2		3		4		5		6	
		Prozesse	Ort	Zeit	Ort								
1	beladen	S1	10	S1	10	S1	10	S1	10	S2	10	S3	10
2	fahren	S3	16	S3	16	S2	15	S2	15	S3	21	S4	19
3	beladen	S3	10	S3	10	S2	10	S2	10	S3	10	S4	10
4	fahren	A	199	A	199	S4	20	S4	20	S4	19	A	180
5	beladen	-	-	-	-	S4	10	S4	10	S4	10	-	-
6	fahren	-	-	-	-	A	180	A	180	A	180	-	-
7	entladen	A	30	A	30	A	30	A	30	A	30	A	32
8	fahren	S1	202	S1	202	S1	202	S1	202	S2	200	S3	199
9	pause	S1	13	S1	130	S1	3	S1	3	S2	-	S3	-

Tabelle 13: Dispositionsplan für die Lkws

lichst gute Ausnutzung der Lkw Kapazitäten zu erreichen, die zu möglichst wenig Engpässen in der Montage führt. Nachdem iterativ die Touren der Lkw festgelegt sind, ergibt sich der Dispositionsplan der Lkws aus Tabelle 13.

Zunächst werden die Regelsätze so eingestellt, daß sie ähnliche Ergebnisse liefern wie der Fahrplan. Es werden dabei keine Veränderungen des Umfelds betrachtet. Danach soll das dynamische Verhalten getestet werden. Folgende Situationen werden dafür miteinander verglichen:

1. Die Lkw erhalten einen festen Fahrplan, den sie ohne Reaktion auf eventuelle Störungen durchsetzen.
2. Lkws versuchen, diesen Plan den Gegebenheiten der Situation anzupassen, indem sie das Verhandlungsschema anwenden. Dadurch kann der vorgegebene Plan aufgelöst werden und dynamisch an die Situation angepaßt werden.

Die Simulation soll die Auswirkung der Situationen 1 und 2 auf die Termineinhaltung in der Montage sowie auf die Transportzeiten und Auslastungen der Lkws zeigen. Bild 76 zeigt die Auswertung der Ergebnisse der Simulation. Fünf Simulationsläufe wurden durchgeführt. Ein Simulationslauf erfolgte für die Situation 1 mit festen Fahrplan. In den weiteren Simulationsläufen wurden die Regelsätze S, A, T sowie alle zusammen untersucht. Dabei schnitt die Steuerung mit festen Fahrplan (static) am schlechtesten ab. Bemerkenswert ist, daß die parallele Anwendung aller Regeln nicht immer zum besten Ergebnis führt. Zieht man jedoch die Transportzeiten und Auslastungen der Lkws hinzu, dann zeigt sich, daß das System überlegen ist, in dem alle Regeln parallel angewandt werden.

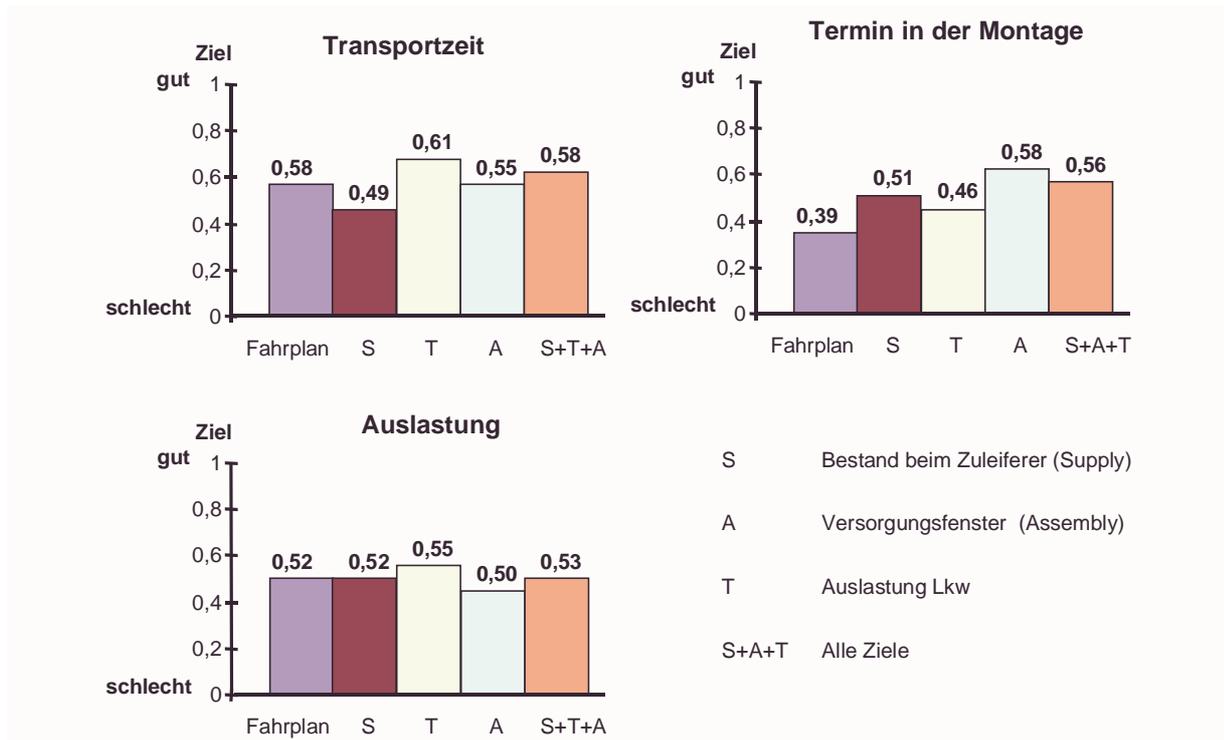


Bild 76: Ergebnisse zur Termingerechtigkeit der Simulationsläufe

Die Auswahl der Regeln, die zur Anwendung im Verbund kommen, hängt von den Partnern Zulieferanten, Transportunternehmer und Finalproduzent ab. Hierbei müssen sich die Partner interaktiv auf anzuwendende Regeln einigen. Beispielsweise zeigt Bild 77 die Zielfunktion Termineinhaltung in der Montage (siehe Bild 4) für die Module Klimaanlage. Der Zielverlauf sagt aus, daß eine Materialversorgung innerhalb des Zeitraums von 2 bis 6 Stunden vor dem Verbaupunkt vom Finalproduzenten als „gut“ bezeichnet wird. Andere Material-

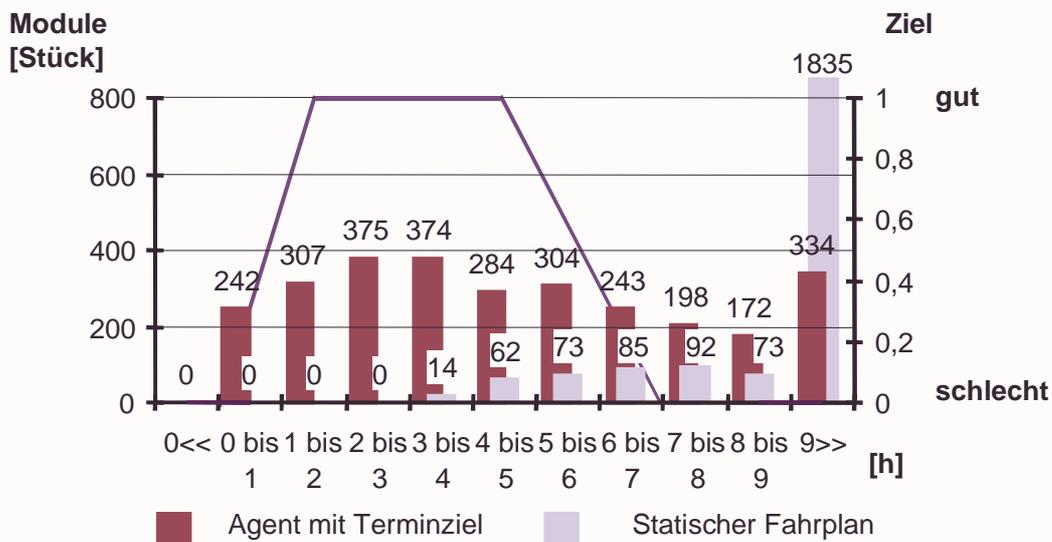


Bild 77: Zielfunktion und Stückzahlen der Module pro Zeiteinheit

versorgungszeiten hingegen entsprechend schlechter.

Zusätzlich wurden die Stückzahlen der Module Klimaanlage pro Zeiteinheit aus der Simulationsläufen Situation 1 und Situation 2 mit dem Regelsatz A eingetragen. Es zeigt sich, daß hier wesentliche Verbesserungen erzielt wurden. Der Finalproduzent hat also Vorteile daraus, wenn der Transportunternehmer die Lkws mit den Regelsätzen A ausstattet. Auf der anderen Seite zeigt Bild 76 schlechte Auslastungen und Transportzeiten der Lkw mit dem Regelsatz A. Hier gilt es für die Partner eine Kompromißlösung zu finden. Es ist durchaus möglich, daß aus dem Dialog zwischen Transportunternehmer und Finalproduzent weitere Regeln entstehen, die zu einer Verbesserung des Systems führen.

Weitere Simulationsanordnungen sind vorstellbar. Auf Werksebene führt das Auflösen der Zulieferanten „reinen“ Materialversorgung zu einer stärkeren Vernetzung. Führen bisher Lkw nur eine Entladezone innerhalb des Werkes an, werden durch das Bündeln verschiedener Ladungen mehrere Entladezonen angefahren. Das bedeutet unter Umständen längere Wartezeiten der Lkws und somit auch Liegezeiten für die Komponenten. Längere Liegezeiten könnten sich wiederum auf die Zielfunktion Termineinhaltung Bild 77 auswirken. Um diesen Einfluß mit in die Simulationsläufe einzubeziehen, ist eine Kopplung des Simulationssystems „Finalmontage“ mit weiteren Simulationssystemen des Finalproduzenten sinnvoll.

Beispielhaft zeigt Bild 78 eine solche Kopplung. Das erste Modell umfaßt den gesamten Materialversorgungsprozeß, das Industriegebiet mit den Zulieferanten und die Finalmontage mit den Subsystemen Lager, Lkw und deren Kapazitäten. Das zweite Modell detailliert die Finalmontage mit dem werksinternen Verkehrsfluß. Auswirkungen der Stausituationen können auf diese Weise erkannt werden.

Die Versuche zeigen, daß durch eine verteilte Simulationsanordnung die Partner die Möglichkeit haben, nicht nur ihre Kapazitäten zu optimieren, sondern auch ihre Wirtschaftlichkeit im Sinne des Gesamtoptimums. Beispielsweise kann das Transportunternehmen hierfür auf Basis des Transportvolumens bezahlt werden und dafür an das Informationssystem der Finalmontage und der Zulieferanten gekoppelt werden, damit Lkws des Transportunternehmens für den Regelsatz T aktuelle Bestände in der Finalmontage abfragen können. Das gleiche gilt auch für den Zulieferanten, da er ebenfalls dynamisch sein Produktionsprogramm anpassen kann.

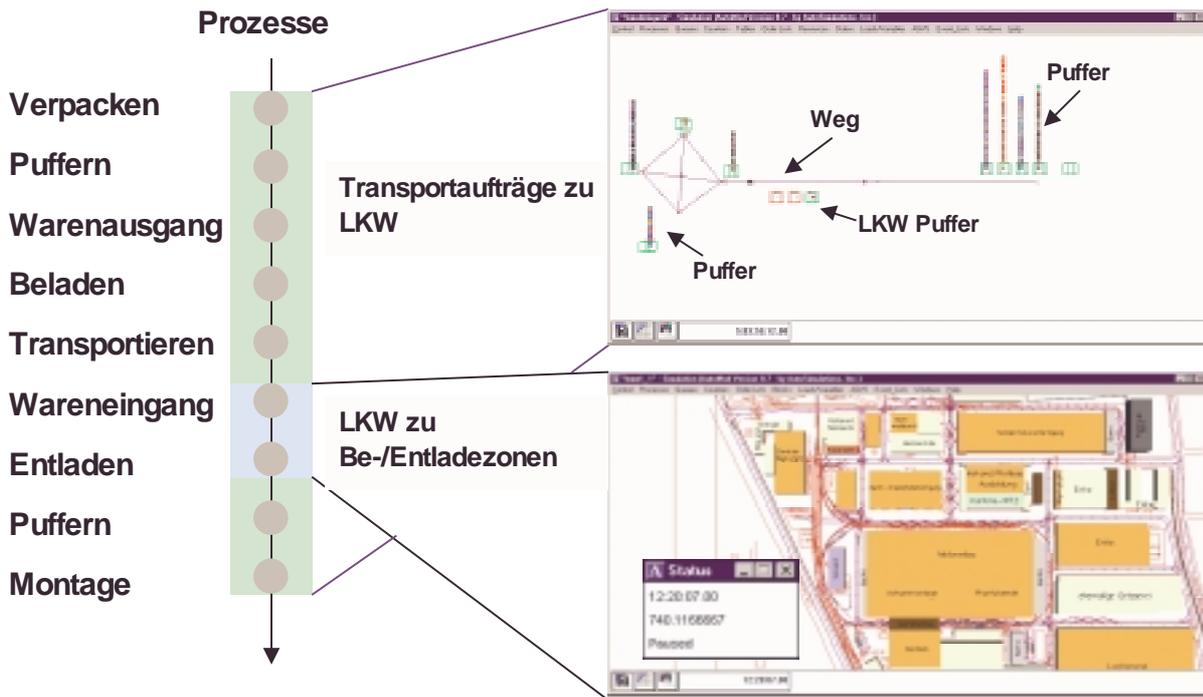


Bild 78: Kopplungshierarchie von Simulatoren

7 Zusammenfassung und Ausblick

Der starke Wettbewerbsdruck führt zu neuen Anforderungen an die Dynamik in den Unternehmen. Sie müssen den täglichen Schwankungen in Absatzmenge und langfristigen Produktänderungen standhalten. So liegt die Materialversorgung nicht mehr in der Hand eines einzelnen Unternehmens, sondern die Leistungsfähigkeit wird durch das Zusammenspiel von Zulieferant, Transportunternehmer und Finalproduzent bestimmt. Im Hinblick auf die verteilte Leistungserstellung im Materialversorgungsprozeß sind neue Simulationskonzepte erforderlich.

In dieser Arbeit wurde ein verteilter Ansatz zur Simulation des Materialversorgungsprozesses entwickelt. Der Vorteil dieses Ansatzes liegt darin, daß er bestehende Simulationssysteme und -modelle bei den Partnern integriert und so keine weiteren Modellierungsarbeiten und Schulungen durchgeführt werden müssen. Aufbau und Dimensionierung eines Versorgungsverbundes erfolgen dezentral bei den Partnern, während die Auswirkung für den Verbund und die Bedeutung für die einzelnen Ziele gemeinsam in der Simulation gemessen werden kann.

Zur Kommunikation zwischen den Simulations- und Experimentiersystemen sind Standards für den Nachrichtenaustausch definiert und ein Schnittstellenmodell zur Verfügung gestellt worden, das alle zur Kommunikation relevanten Daten enthält. Das entwickelte System setzt sich dafür aus vier Grundtypen zusammen, die über ein Rechnernetz verknüpft sind. Dazu gehören Ressourcen, Verbraucher, Broker und Beobachter. Jedes dieser Subsysteme wurde in zwei Ebenen gegliedert: Ausführungssystem und Informationssystem. Im Ausführungssystem läuft der physische Materialfluß ab, der in der Wirklichkeit dem Materialversorgungsprozeß entspricht. Auftrags-, Kenn- und Faktordaten sowie Nachrichten zur Versuchsplanung werden zwischen den Informationssystemen ausgetauscht.

Beobachter sind Experimentiersysteme der Partner, über welche die Partner Einstellungen von Faktoren vornehmen und diese untereinander austauschen sowie Simulationen starten können. Die Steuerung der Materialversorgung erfolgt dezentral im Zusammenspiel zwischen Broker, Verbraucher und Ressourcen. Im Materialversorgungsprozeß erteilt der Finalproduzent dem Zulieferanten Aufträge sowie der Zulieferant dem Transportunternehmer. Diese Rolle wird durch Verbraucher abgebildet. Des weiteren stellen Zulieferanten und Transportunternehmen Ressourcen zur Verfügung. Eine günstige Zuteilung von Ressourcen und Aufträgen wird durch Interaktionen zwischen Verbraucher und Ressourcen entschieden.

Dafür erfolgte ein Entwurf der Dialoge für Verhandlungen zwischen diesen Subsystemen. Um Zuordnungsstrategien besser implementieren zu können, wurde eine agentenbasierte

Koordination integriert. So können beispielsweise Verhandlungen zwischen Auftrag und Ressourcen Agenten effizient abgebildet werden. Broker erfüllen hier die Aufgabe, Ressourcen bzw. Verbrauchern eine große Auswahl an Verhandlungspartnern zu präsentieren.

Um die Kopplung dieser Subsysteme durchzuführen, wurde auf die High Level Architecture (HLA) zurückgegriffen. Die High Level Architecture (HLA) erlaubt die Teilnahme unterschiedlicher Beteiligter an einer Simulation und stellt die dafür notwendigen Synchronisationsmechanismen zur Verfügung. Basierend auf dieser Plattform wurden die Basisklassen für eine Kopplung in der Versorgungsdomäne entwickelt.

Für die Koordination des Materialflusses in Versorgungsprozessen ist ein Verhandlungsschema auf Basis der Koordinationssprache (COOL) entworfen worden. Dazu wurden Konversationsklassen für die Verbraucher und Ressourcen sowie für die Vermittler entwickelt. Störungen entlang des Versorgungsprozesses erschweren die Steuerung und erfordern ein dynamisches Anpassen der Pläne. Um den Verbrauchern bzw. Ressourcen ein Bewertungsschema in Entscheidungssituationen in die Hand zu geben, wurden die Agenten mit einer fuzzy-logischen Regelbasis ausgestattet. Dadurch ist es den Agenten möglich, zu jeder Zeit ihren spezifischen Verhandlungswert zu bestimmen. Die Ergebnisse der Simulation eines Versorgungsprozesses in der Automobilindustrie zeigen, daß die Koordination durch diese Vorgehensweise verbessert werden kann.

Folgende weiterführende Arbeiten sind sinnvoll:

1. Experimentiersysteme müssen weiterentwickelt werden, so daß sie den Austausch der Faktoren zwischen den Partnern, das Starten paralleler Simulationen und die Auswertung unterstützen.
2. In der dynamischen Rekonfiguration läßt sich der Handlungsspielraum von Verbraucher, Ressourcen und Broker erweitern. Beispielsweise könnten verschiedene Planungshorizonte eingeführt werden.
3. Ebenso läßt sich die Benutzerschnittstelle zu Broker, Verbrauchern und Ressourcen weiterentwickeln. Das Hauptaugenmerk liegt darauf, Regeln interaktiv festzulegen, da bisher eine Änderung der Regeln zu einem neuen Übersetzen des Kommunikationsmoduls führt.

8 Literatur

- /1/ Ahrens, V.: Dezentrale Produktionsplanung und –steuerung: Systemtheoretische Grundlagen und Anwendungspotentiale. Fortschrittsberichte VDI, Reihe 2: Fertigungstechnik. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1998.
- /2/ Albyrak, S.;
Wieczorek, D.;
Kirsch, D.: Intelligente Agenten in der Fertigungsautomatisierung. In: Industrie Management 14(1998)3, S. 62-64.
- /3/ Amann, W.: Eine Simulationsumgebung für Planung und Betrieb von Produktionssystemen. Forschungsberichte Band 71, Berichte aus dem Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften der Technischen Universität München, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1994.
- /4/ Austin, J. L.: How to do things with words. Harvard University Press Cambridge, 1962.
- /5/ AutoSimulations
Inc.: AutoMod User's Manual, 1993.
- /6/ Barbuceanu, M.,
Fox, S. M., Capturing and Modeling Coordination Knowledge for Multi-Agent Systems. Internation Journal of Cooperative Information Systems, Vol.5 Nos.2-3, 1996, S. 273-314
- /7/ Barbuceanu, M.,
Fox, S. M., COOL: A language for Describing Coordination in Multi-Agent-Systems. Enterprise Integration Laboratory, University of Toronto, 1994.
- /8/ Böcking, Stefan: Objektorientierte Netzwerkprotokolle: Grundlagen, Entwurf und Implementierung, 1. Auflage, Addison-Wesley Verlag, Bonn, New York, Amsterdam, 1997.
- /9/ Booch, Grady: Object-oriented Analysis and Design with Applications. 2. Auflage, Benjamin/Cummings Publishing Company, Inc., Redwood City, Menlo Park, 1994.
- /10/ Bothe, H.-H.: Neuro-Fuzzy-Methoden. Einführung in die Theorie und Anwendungen. Springer Verlag, berlin, heidelberg, New York, 1998.

-
- /11/ Brenner, W.;
Zarnekow, R.;
Wittig, H.:
Intelligente Softwareagenten: Grundlagen und Anwendungen.
Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1998.
- /12/ Brooks, R. A.:
The Behavior Language; Users's Guide, In: M.I.T Artificial In-
telligence Laboratory, AI Memo 1227, Cambridge, 1990.
- /13/ Byrne, J. A.;
Brand, R.;
Port, O.:
The Virtual Corporation. Business Week, February 8, 1993, S.
37.
- /14/ Chan, F. T. S.;
Smith, A. M.:
Simulation Approach to Assembly Line Modification: A Case
Study. Journal of Manufacturing Systems, Vol. 12/No. 3,
Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 1992.
- /15/ CORBA:
The Common Object Request Broker: Architecture and Speci-
fication, <http://www.omg.org/corba/corbiiop.htm>, 1995.
- /16/ Daenzer, W. F.;
Huber, F. (Hrsg.):
Systems Engineering. Methodik und Praxis. 7. Auflage, Sprin-
ger-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1992.
- /17/ Dangelmaier, W.:
Vision-Logistik – Wandelbare Produktionsnetze zur Auflösung
ökonomisch-ökologischer Zielkonflikte. Hrsg.: Dangelmaier,
W., Kirsten, U., PFT-Endbericht zu dem gleichnamigen BMBF-
Projekt, Karlsruhe, 1996.
- /18/ Dangelmaier, W.;
Becker, B.-D.;
Kämpf, R.:
Die Steuerung der Materialflußsysteme - Zusammenfassung
von Simulationskonzepten zur Softwareerstellung. In: wt
Werkstattechnik 81 (1991), S. 695-698.
- /19/ Das, S.;
Fujimoto, R.M.;
et al.:
GTW: A Time Warp System for Shared Memory Multiproces-
sors. In Proceedings of 1994 Winter Simulation Conference,
S. 1332-1339, 12, 1994.
- /20/ Davidow, W. H.;
Melone, M. S.:
The Virtual Corperation: Structuring and revitalizing the
corporation for the 21st century, New York, 1992.
- /21/ Defense Modeling
and Simulation Of-
fice (DMSO):
HLA Time Management Design Document, *Version 1.0, dated
15 August 1996*. Available online at the HLA Homepage: URL
<http://hla.dmsomil/>, DMSO, 1997.
- /22/ Defense Modeling
and Simulation Of-
fice (DMSO):
High Level Architecture Rules, Version 1.0, dated 15 August
1996. Available online at the HLA Homepage: URL
<http://hla.dmsomil/>. 1996.

- /23/ Defense Modeling and Simulation Office (DMSO): High Level Architecture Interface Specification, Version 1.2. Available online at the HLA Homepage: URL <http://hla.dmsomil/>. 1997.
- /24/ DIN 30781 Transportkette. Deutsches Institut für Normung e. V., Beuth-Verlag, Berlin, 1989.
- /25/ Duffie, N.A.; Piper, R.S.: Non-Hierarchical Control of Manufacturing Systems. Journal of Manufacturing Systems, 13(2), S. 137-139, 1986.
- /26/ Duran, J.E.; Franklin, S.; Jennings, N.R.; Norman, T.J.: On Cooperation in Multi-Agent Systems, In: The Knowledge Engineering Review, 12(1997)3, Internet URL: <http://www.elec.qmw.ac.uk/dai/pubs/fomas.html> (stand 1997), 1997.
- /27/ Durfee, E. H.; Lesser, V. R.: Partial Global Planning: A coordination framework for distributed hypothesis formation. In: IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 21(1991)5, S. 1167-1183.
- /28/ Eversheim, W.; Fuhlbrügge, M.; Dobberstein, M.: Produktivitätssteigerung durch simulationsgestützte Auftragsreihenfolgeoptimierung. In VDI-Z Band 136, Nr. 9, 1994, Seite 30-32.
- /29/ Eversheim, W.; Schuth, S.; Bremer, C. F.; Molina, A.: Globale virtuelle Unternehmen – Entwickeln und produzieren in weltweiten Netzwerken. In: Zwf 93(1998)3, Seite 62-64.
- /30/ Feldmann, G.; Reinhart, G.: Simulation – Schlüsseltechnologie der Zukunft? Utz Verlag Wissenschaft, München, 1997.
- /31/ Fischer, R.: The Design of Experiments. 8. Auflage, Hafner Verlag, New York, 1966.
- /32/ Fischer, K.; Heimig, I.; Kocian, C.; Müller, J.P.: Intelligente Assistenten für das Management Virtueller Unternehmen. In: IM Information Management 11, 1996, 1, S. 38-45.
- /33/ Fischer, K.; Kuhn, N.; Müller, H.-J.; Pischel, M.; Schroth, A.: Verteiltes Problemlösen im Transportwesen. In: IM Informationsmanagement 2/93, Computerwoche Verlag, München, 1993.

- /34/ Fischer, K.: The Design of an Intelligent Manufacturing System. In: Proceedings of the 2nd International Working Conference on Cooperating Knowledge-based Systems, University of Keele, S. 83-99, 1994.
- /35/ Fox, M.S.;
Sycara, K.P.: Overview of CORTES – A Constraint-Based Approach to Production Planning, Scheduling and Control. In: Goslar, M.D. (Hrsg.) Proceedings of the 4th International Conference on Expert Systems in Production and Operations Management. South Carolina, 1990.
- /36/ Fritsche, Bodo: Die Zukunft von PPS und Supply Chain. In: Logistik - Heute, Hun-Verlag, 5 (1999).
- /37/ Fujimoto, R.: Parallel Discrete Event Simulation. In Communications of the ACM, 1990, no. 10, S. 30-53.
- /38/ Fujimoto, R.: Zero Lookahead and Repeatability in the High Level Architecture. Proceedings of the Spring 1997 Simulation Interoperability Workshop, March 3-7, Orlando. Paper No. SIW97S-046, <http://www.dmsomil/projects/hla/papers/>
- /39/ Fujimoto, R.: Time Management in The High Level Architecture. In: Simulation, Simulation Council, San-Diego, Vol. 71 Nr. 6 (12) 1998.
- /40/ Glaser, H.;
Geiger, W.;
Rohde, V.: PPS-Grundlagen-Konzepte-Anwendungen. Gabler-Verlag, Wiesbaden, 1991.
- /41/ Gutenberg, E.: Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre, Band 1: Die Produktion. 24. Auflage, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1984.
- /42/ Habefellner, R.;
Becker, M;
Büchel, A.,
et al.: Systems Engineering: Methodik und Praxis. Hrsg. Daenzer W.F., Huber, F., Verlag industrielle Organisation Zürich, 1994.
- /43/ Heitz, M.-J.; Ernst,
W.: Planung von Qualifikationsstrukturen mit Hilfe der Simulation. wt Werkstatttechnik 81 (1991), S.168-170.
- /44/ Henriksen, J. O.: SLX and Proof Animation: Improved Integration of Simulation and Animation. In Deussen, O. and P. Lorenz (Ed.), Proceedings of the Simulation und Animation Conference Magdeburg,

- March 6.-7., 1997. SCS European Publishing House San Diego / Erlangen / Ghent / Budapest 1997, S. 287-294.
- /45/ Iwata, K.;
Onosato, M.: Random Manufacturing System: a New Concept of Manufacturing Systems for Production to Order. Annals of the CIRP Vol. 43/1, 1994.
- /46/ Jünemann R.: Materialfluß und Logistik: Systemtechnische Grundlagen mit Praxisbeispielen. Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Springer Verlag 1989.
- /47/ Kernler, H.: PPS der 3. Generation: Grundlagen, Methoden, Anregungen, Hüthig-Verlag, Heidelberg, 1993.
- /48/ Kettner, H.;
Schmidt, J.;
Greim, H.-J.: Leitfaden zur systematischen Fabrikplanung. Carl Hanser Verlag, München, Wien, 1984.
- /49/ Kornfeld, W. A.;
Hewit, C. E.: The Scientific Community Metaphor. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics. SCM.11, 1981.
- /50/ Kosko, B.: Fuzzy Logisch: Eine neue Art des Denkens. ECON Taschenbuchverlag GmbH, Düsseldorf, 1995.
- /51/ Krüger, A.;
Schleinkofer, A.: Varianten besser beherrschen. In: Automobil-Produktion, August, 1998.
- /52/ Krützfeldt, D.;
Seliger, G.: Efficient design of simulation runs for the optimization of assembly systems. Managing Enterprises – Stakeholders, Engineering, Logistics, and Achievement (ME-SELA'97), Loughborough, 1997, S. 587-592.
- /53/ Krützfeldt, D.,
Heinrichsdorff, P.,
Seliger, G., Just-In-Time requires Communication: An Agent-based Approach. In: Computer-Aided Production Engineering, Proceedings of the 15th CAPE Conference, Hrsg.: Maropoulos, P.G.; McGeough, J.A., University of Durham, 19-21 April 1999.
- /54/ Krug, W.: Optimierungssoftware ISSOP. In: wt Werkstatttechnik, Springer VDI Verlag, Heft 1/2, 1999.
- /55/ Kuhn, A., Schmidt,
R.: Simulation logistischer Systeme. In: Simulation und Fabrikbetrieb, ASIM Tagungsbericht, München, gfmt Verlag, 1988.

- /56/ Kuhn, H.: Klassische Versuchsplanung, Tagushi-Methode, Shanin-Methode: Versuch einer Wertung. VDI-Z, (12) Dezember, 1990, S. 91-94.
- /57/ Kurbel, K.: Produktionsplanung und –steuerung: Methodische Grundlagen von PPS-Systemen und Erweiterungen, Oldenbourg Verlag, München 1993.
- /58/ Liebl, F.: Simulation - Problemorientierte Einführung, Oldenbourg Verlag, München, Wien, 1995.
- /59/ Law, A.M.;
Kelton, W.D.: Simulation Modelling and Analysis. McGraw- Hill, New York, 1991.
- /60/ Lin, G.Y.-J.;
Solberg, J. J.: Integrated Shop Floor Control Using Autonomous Agents. IIE Transactions: Design and Manufacturing, 24(3), 1992, S. 57-71.
- /61/ Low, Y-H.;
Lim, Ch.-Ch.;
et al.: Survey of Languages and Runtime Libraries for Parallel Discrete-Event Simulation. In: Simulation: Special Issue: Parallel and Distributed Simulation, Simulation Council, San Diego, (3) 1999.
- /62/ Maes, P.: Agenten: Intelligente Software. In: Spektrum der Wissenschaft, Spezial 4, Schlüsseltechnologien im 21. Jahrhundert, Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg, 1995.
- /63/ Mertens, P;
Spieck, St.;
Falk, J.: Unterstützung der Lager- und Transportlogistik durch teilintelligente Agenten. In: IM Informationsmanagement 2/93, Computerwoche Verlag, München, 1993.
- /64/ Milberg, J., Hart-
berger, H: PLATO-SIM - Wissensbasierte Simulation in Anlagenplanung. In: VDI-Z 134 (1992) 5, S. 51-54.
- /65/ Miles,R.E.;
Snow, C.C.: Network Organizations: New Concepts for New Forms. In: California Management Review 28, 1986, Spring, S. 62-73.
- /66/ Mitaim, S.;
Kosko, B.: Neural Fuzzy Agents for Profile Learning and Adaptive Object Matching. Department of Electrical Engineering – Systems, University of California, Los Angeles, 1996.
- /67/ Montgomery, D.: Design and Analysis of Experiments. John Wiley and Sons,

- New York, 1991.
- /68/ Neupert, H.: GRAFSIM- grafisch interaktiver Simulator für flexible Fertigungssysteme mit Werkzeuglogistik. In: Simulation in der Fertigungstechnik, Fachberichte Simulation. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1988.
- /69/ Nicolai, H.;
Schotten, M.;
Much, D.: Aufgaben der Produktionsplanung und -steuerung. In: Produktionsplanung und -steuerung: Grundlagen, Gestaltung und Konzepte. Hrsg.: Luczak, H., Eversheim, W., Schotten, M., Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1998.
- /70/ Norman, V. B.: AutoMod. Proceedings of the 1992 Winter Simulation Conference, Arlington, VA, 1992. S. 328-334.
- /71/ Ohno, T.: Das Toyota-Produktionssystem. Campus-Verlag, Frankfurt, 1993.
- /72/ Orfali, R.;
Harkey, D.;
Edwards, J.: The Essential Client/Server Survival Guide. 2. Auflage, John Wiley&Sons, Inc., New York, 1996.
- /73/ Orfali, R.;
Harkey, D.;
Edwards, J.: Instant CORBA. John Wiley&Sons, Inc., New York, 1997.
- /74/ Ow, P.S.;
Smith, S.F.: A Cooperative Scheduling System. In: Proceeding of the 2nd International Conference on Expert Systems and the Leading Edge Production Planning and Control S. 43-56, 1988.
- /75/ Pawellek, G.; Best,
B.: Anwendung kybernetischer Prinzipien zur Produktionsorganisation und -steuerung. In: VDI-Z 134 (1992) 3, S. 90-93.
- /76/ Pfeifer, T.: Qualitätsmanagement: Strategien, Methoden, Techniken. Carl Hanser Verlag, München, Wien, 1993.
- /77/ Picot, A.;
Reichwald, R.;
Wigand, R.T.: Die grenzenlose Unternehmung: Information, Organisation und Management. Wiesbaden 1996.
- /78/ Prahalad, C.K.;
Hamel: The Core Competence of the Corporation. In: Harvard Business 68, 1990, 3, S. 79-91.
- /79/ ProModel Corporation ProModel Reference Guide. 1997.

- /80/ PSII GmbH
Berlin: NET Systembeschreibung Release 4.0, 1990.
- /81/ Reinhart, G.;
Feldmann, K.: Simulation - Schlüsseltechnologie der Zukunft? Herbert Utz Verlag, München, 1997.
- /82/ Reinhart, G.;
Lulay, W. E.: Koordination dezentraler Produktionsstrukturen durch begleitende Simulation. In: Informations- und Kommunikationstechnik, ZWF, Hanser-Verlag, 93, 1998.
- /83/ Ropohl, G.: Allgemeine Technologie: Eine Systemtheorie der Technik. 2. Aufl., Hanser Verlag, München, Wien, 1999.
- /84/ Rumbbaugh, J.: Objektorientiertes Modellieren und Entwerfen, Hanser-Verlag, München, 1993.
- /85/ Sauerbier, Th.: Theorie und Praxis von Simulationssystemen; Vieweg-Verlag, Braunschweig, Wiesbaden, 1999.
- /86/ Scholz-Reiter, B.: CIM-Informations- und Kommunikationssysteme: Darstellung von Methoden und Konzeption eines rechnergestützten Werkzeugs für die Planung. Oldenbourg Verlag, München, Wien, 1990.
- /87/ Schotten, M.: Aachener PPS Modell. In: Produktionsplanung und -steuerung: Grundlagen, Gestaltung und Konzepte. Hrsg.: Luczak, H., Eversheim, W., Schotten, M., Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1998.
- /88/ Schulze, Th.;
Straßburger, St.;
Klein, U.: Migration of HLA into Civil Domains: Solutions and Prototypes for Transportation Applications. In: Simulation: Special Issue High Level Architecture, Simulation Council, San Diego, 1999.
- /89/ Seliger, G.: Montage als Schwerpunkt produktionstechnischer Unternehmensstrategie. In: Montagetechnik Tagungsband, gmft Verlag, München, 1989.
- /90/ Seliger, G.;
Heinemeier, H.-J.;
Gleue, V.;
Wang, Y.: Integrierte Montageplanung – vom Produkt zum Anlagenlayout. VDI Berichte 824: Rechnergestützte Fabrikplanung'90, Düsseldorf: VDI Verlag, 1990.
- /91/ Seliger, G.;
Krütfeldt, D.: Agent-based Control of Assembly. Annals of the CIRP Vol. 48/1, 1999.

- /92/ Seliger, G.; Krützfeldt, D.; Perlewitz, H.: SIMPAD - Simulationsexperimente effizient planen und durchführen, S. 411-420, 8. ASIM-Fachtagung, Berlin, 1998.
- /93/ Seliger, G.; Krützfeldt, D.; Strassburger, S.; Lorenz, P.: On the HLA- and Internet-Based Coupling of Commercial Simulation Tools for Production Networks. Proceedings of the 1999 International Conference on Web-Based Modeling and Simulation. San Francisco, California, January 17-20, 1999.
- /94/ Seliger, G.; Weber, H.: Kurze Wege zum Markt. Tagung im Produktionstechnischen Zentrum Berlin: Neue Strategien Industrieller Revolution 2 – Mitarbeiterorientierte Produktentwicklung in Mittelständischen Unternehmen, S. 15-30, Bremerhaven, Wirtschaftsverlag NW, 1996
- /95/ Shen, W.; Norrie, D. H.: Agent-based Systems for Intelligent Manufacturing: A state of the art survey. Division of Manufacturing Engineering, University of Calgary, <http://imsg.enme.ucalgary.ca>, 1999.
- /96/ Shen W.; Norrie, D.H.: An Agent-Based Approach for Dynamic Manufacturing Scheduling. In: Proceedings of Autonomous Agents'98 Workshop on Agent-Based Manufacturing, Minneapolis/St. Paul, MN, May 10, S. 117-128, 1998
- /97/ Shen W.; Xue, D.; Norrie, D.H.: An Agent-Based Manufacturing Enterprise Infrastructure for Distributed Integrated Intelligent Manufacturing Systems. In Proceedings of PAAM'98, London, UK, S. 533-548, 1998.
- /98/ Smith, R. G.: The contract net protocol: High level communication and control in a distributed problem solver. In: IEEE Transactionson Computers, 29(1980)12, S. 1104-1113.
- /99/ Splanemann, Ralph: Teilautomatische Generierung von Simulationsmodellen aus systemneutral definierten Unternehmensdaten. Verlag Mainz, Wissenschaftsverlag, Aachen, 1996.
- /100/ Spur, G.: Optimierung des Fertigungssystems Werkzeugmaschine. Hanser Verlag, München Wien, 1972.
- /101/ Spur, G.; Stöferle, Th.: Handbuch der Fertigungstechnik. Band 5, Fügen Handhaben Montieren. München, Wien: Carl Hanser Verlag, 1986.

- /102/ Spur, G.;
Stoeferle, Th.: Handbuch der Fertigungstechnik. Band 6, Fabrikbetrieb. München, Wien: Carl Hanser Verlag, 1994.
- /103/ Spur, G.;
Mertins, K.; Wieneke-Toutaoui; B.;
Rabe, M.: MOSYS - A Plannig System for Manufacturing and Assembly Planning. Simulation in Manufacturing (SIM5). IFS Conferences, Bredford, 1989
- /104/ Stiefbold, O.: Konzeption eines reaktionsschnellen Planungssystems für Logistikketten auf Basis von Softwareagenten: Ansatz zur planung und Steuerung von terteilten Produktionssystemen mit heteragenen IV-Systemen. Forschungsberichte aus dem Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebstechnik, Universität Karlsruhe, Dissertation, 1998.
- /105/ Sydow, J.: Netzwerkorganisation. Interne und externe Restrukturierung von Unternehmungen. In: Wirtschaftswissenschaftliches Studium 24, 1995, 12, S. 629-634.
- /106/ Thomas, J. D.;
Griffin, P. M.: Coordinated supply chain management. European Journal of Operational Research 94(1996), S. 1-15.
- /107/ VDI-Richtlinie
2411 Lagern und Fördern. VDI-Handbuch Materialfluß- und Förder-technik, Band 7, VDI-Handbuch Betriebstechnik, Teil 1, Beuth-Verlag, Berlin, Düsseldorf, 1996.
- /108/ VDI-Richtlinie
2815: Begriffe für die Produktionsplanung und -steuerung. VDI-Handbuch Betriebstechnik, Beuth-Verlag, Berlin, Düsseldorf, 1978.
- /109/ VDI-Richtlinie
2860: Handhabungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen, Begriffe, Definitionen, Symbole. VDI-Handbuch Materialfluß- und Fördertechnik, VDI-Handbuch Betriebstechnik, Teil 3, Beuth-Verlag, Berlin, Düsseldorf, 1990.
- /110/ VDI-Richtlinie
3633 Simulation von Logistik-, Materialfluß- und Produktionssystemen. Blatt 1: Grundlagen, Beuth-Verlag, 1993.
- /111/ Wang, Y.: Methode für die simulationsunterstützte Optimierung am Beispiel von Montagesystemen. Hanser Verlag, München, 1995.
- /112/ Weber, J.;
Kummer, S.: Logistikmanagement. 2., aktualisierte Auflage, Schäfer-Poeschel Verlag, 1998.

- /113/ Wiendahl, H.-P.: Belastungsorientierte Fertigungssteuerung. Carl Hanser Verlag. München, Wien, 1987.
- /114/ Wiendahl, H.-P.; Ahrens, V.: Agent-based control of self-organized production systems. CIRP General Assembly. Tianjin, China, 1997.
- /115/ Wiendahl, H.-P.; Fastabend, H.; Helms, K.; Jäger, M.: Zukünftige PPS-Systeme müssen Logistik-Netzwerke beherrschen. Industrie Management-Special „PPS Management“ 1996, S. 6-10.
- /116/ Wiendahl, H.-P.; Fastabend, H.; Helms, K.: Netzwerkfähiges Produktionsmanagement in wandelbaren Produktionsnetzen. Beitrag zum IFA-Kolloquium. Dezentrale Strukturen – Stand – Erfahrungen – Trends. Am 17. Und 18. September 1996 in Hannover.
- /117/ Wiendahl, H.-P.; Kuhn, A.; Beckmann, H.; Fastabend, H.; Helms, K.: Kooperatives Management in wandelbaren Produktionsnetzen: Vom integrierten Prozeß- und Wirkmodell zum Assistenzsystem. In: Industrie Management 12 (1996), Heft 6, S. 23- 28.
- /118/ Wildemann, H.: Netzwerkstrukturen als neue Form der Unternehmensorganisation. In: Zwf 91(1996)1-2, Seite 12-16.
- /119/ Wildemann, H.: Das Just-in-Time-Konzept: Produktion und Zulieferung auf Abruf. 2.neubearbeitete Auflage, gfmt-Verlag, München, 1988.
- /120/ Zäpfel, G.: Entwicklungsstand und –tendenzen von PPS-Systemen. In: Handbuch Produktionsmanagement, Hrsg. Corsten, H., Gabler-Verlag, Wiesbaden, 1994, S. 719-745.
- /121/ Zelewski, St.; Bode, J.: Koordination von Produktionsprozessen – Ein Ansatz auf Basis von Multi-Agenten-Systemen. In: IM Informationsmanagement 2/93, Computerwoche Verlag, München, 1993.
- /122/ Zülch, G.; Grobel, T.: Analyse von Produktionssystemen mit Hilfe der Simulation. In: VDI-Z 132 (1990) 10, S. 176-182.