



HEINZ NIXDORF INSTITUT
Universität Paderborn
Wirtschaftsinformatik, insbesondere CIM

Dissertation

**Eine theoretische und praktische Herleitung eines
Verfahrens für die kostenminimale Koordination von
Lieferanten und Logistikdienstleistern zur Belieferung
lieferantengesteuerter Lager**

Carsten Böhle

Dissertation

Eine theoretische und praktische
Herleitung eines Verfahrens für die
kostenminimale Koordination von
Lieferanten und Logistikdienstleistern
zur Belieferung lieferantengesteuerter
Lager

vorgelegt bei
Prof. Dr.-Ing. habil. Wilhelm Dangelmaier

HEINZ NIXDORF INSTITUT
Universität Paderborn
Wirtschaftsinformatik, insbesondere CIM

eingereicht von
Carsten Böhle
6448541
Königstraße 61
33098 Paderborn

Paderborn, 22. Oktober 2010

Now, Sal, we're leaving everything behind us and entering a new and unknown phase of things. All the years and troubles and kicks - and now *this!*

Jack Kerouac: On the Road

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	vii
Tabellenverzeichnis	ix
Abkürzungsverzeichnis	xi
1. Einleitung	1
2. Problemdefinition	7
2.1. Beschreibung des Betrachtungsgegenstandes	7
2.1.1. Abnehmer	10
2.1.2. Lieferant	11
2.1.3. Logistikdienstleister	12
2.1.4. Koordination von Lieferanten und Logistikdienstleister	14
2.2. Koordinationsbedarf zwischen Produktion und Distribution	16
2.2.1. Periodenübergreifend	17
2.2.2. Innerperiodisch	18
2.2.3. Koordinationshindernisse in der Theorie	20
2.2.4. Koordinationshindernisse in der Praxis	21
2.3. Ziele der Arbeit	22
2.3.1. Identifikation ökonomischer und ökologischer Potenziale	23
2.3.2. Modellierung des Produktions- und Transportsystems	24
2.3.3. Abschätzung des theoretischen Optimums	24
2.3.4. Implementierung eines praxisorientierten Planungssystems	25
2.4. Anforderungen an die Problemlösung	26
2.4.1. Anforderungen an die theoretische Problemlösung	26
2.4.2. Anforderungen zur praktischen Umsetzbarkeit	27
3. Stand der Technik	29
3.1. Modellbasierte Verfahren zur Losgrößen- und Routenplanung	29
3.1.1. Losgrößenprobleme	29
3.1.1.1. Klassifizierungsmerkmal Zielfunktion	31
3.1.1.2. Klassifizierungsmerkmal Zeit	32
3.1.1.3. Klassifizierungsmerkmal Ressourcen	32
3.1.1.4. Klassifizierungsmerkmal Produkte	33
3.1.1.5. Standardprobleme	34
3.1.2. Transport- und Flussprobleme	40

3.1.3.	Vehicle Routing-Probleme	41
3.1.3.1.	Ausprägungen des α -Parameters	41
3.1.3.2.	Ausprägungen des β -Parameters	42
3.1.3.3.	Ausprägungen des γ -Parameters	43
3.1.3.4.	Ausprägungen des δ -Parameters	43
3.1.3.5.	Standardprobleme	44
3.1.4.	Koordinierte modellbasierte Verfahren	46
3.1.4.1.	Modellklassifikation nach Sarmiento und Nagi	46
3.1.4.1.1.	Lagerhaltung-Lagerhaltung	47
3.1.4.1.2.	Produktion-Lagerhaltung	47
3.1.4.1.3.	Distribution-Lagerhaltung	48
3.1.4.1.4.	Lagerhaltung-Distribution-Lagerhaltung	49
3.1.4.1.5.	Prod.-Lagerh.-Distr.-Lagerh.	49
3.1.4.1.6.	Prod.-Lagerh.-Distr.-Lagerh.-Prod.	50
3.1.4.2.	Fazit	51
3.2.	Belieferungsverfahren in der Automobilindustrie	51
3.2.1.	Theoretische Konzepte der Belieferungsverfahren	51
3.2.1.1.	Lagerlose abnehmergesteuerte Belieferungsverfahren	52
3.2.1.1.1.	Just-in-Time	52
3.2.1.1.2.	Just-in-Sequence	53
3.2.1.2.	Lagerhaltige Belieferungsverfahren	53
3.2.1.2.1.	Abnehmergesteuert	53
3.2.1.2.2.	Lieferantengesteuert	54
3.2.1.3.	Kooperationen in der Distributionslogistik	55
3.2.2.	Praktische Umsetzung der Belieferungsverfahren	56
3.2.2.1.	Auswahl des Belieferungskonzeptes	56
3.2.2.2.	Sammelgutverkehr und Milk Runs	56
3.3.	IT-gestützte Verfahren zur Koordination	57
3.3.1.	SAP SCM	58
3.3.1.1.	Koordinierte Planung mit Zulieferern	59
3.3.1.2.	Koordinierte Planung mit Spediteuren	59
3.3.2.	SupplyOn	59
3.3.3.	Transportbörsen	60
3.4.	Verfahren zur dezentralen Koordination	61
3.4.1.	Theoretische Grundlagen	61
3.4.1.1.	Methodische Grundlagen	61
3.4.1.1.1.	Hierarchische Antizipation	61
3.4.1.1.2.	Auktionen	62
3.4.1.1.3.	Self Selection	62
3.4.1.1.4.	Automatisierte Verhandlungen	63
3.4.1.2.	Technische Grundlagen	63
3.4.1.2.1.	Multiagentensysteme	63
3.4.1.2.2.	Das FRISCO-Framework	65
3.4.2.	Praxisorientierte Implementierungen	66
3.4.2.1.	MASCOT	67

3.4.2.2.	Agent.Enterprise	67
3.4.2.3.	CoagenS	68
3.4.2.4.	MUST	68
3.4.2.5.	Busch	69
4.	Zu leistende Arbeiten	71
5.	Darstellung der theoretischen und praxisorientierten Lösungskonzepte	73
5.1.	Formalisierung des Planungsproblems	73
5.1.1.	Klassifikation des Losgrößenproblems	73
5.1.2.	Klassifikation des Tourenplanungsproblems	75
5.1.3.	Klassifikation des integrierten Modells	76
5.1.4.	Mathematische Formulierung des integrierten Modells	77
5.1.4.1.	Zielfunktion	79
5.1.4.2.	Produktion	81
5.1.4.3.	Lagerhaltung	86
5.1.4.4.	Materialfluss und Fahrzeugeinsatz	88
5.1.4.5.	Verknüpfung	90
5.1.4.6.	Fazit	92
5.2.	Herleitung des Verfahrens zur Abschätzung des theoretischen Optimums	92
5.2.1.	Sukzessive Lösung	93
5.2.1.1.	Überperiodisch	93
5.2.1.2.	Innerperiodisch	96
5.2.1.2.1.	Produktion	96
5.2.1.2.2.	Transport	99
5.2.2.	Integrierte Lösung	102
5.2.2.1.	Überperiodisch	102
5.2.2.2.	Innerperiodisch	106
5.3.	Herleitung des praxisorientierten Verfahrens	111
5.3.1.	Belieferungskonzept und Prozessgestaltung	111
5.3.2.	Verhandlungsbasierte dezentrale Lösung	115
5.3.2.1.	Konzept eines überperiodischen Planungsprozesses	117
5.3.2.1.1.	Generierung der Koordinationsangebote	118
5.3.2.1.2.	Auswahl des Koordinationsangebots	121
5.3.2.2.	Konzept eines innerperiodischen Planungsprozesses	122
5.3.2.2.1.	Generierung der Koordinationsangebote	122
5.3.2.2.2.	Auswahl des Koordinationsangebots	124
5.3.2.3.	Anmerkungen	124
5.3.3.	Technisches Konzept und Modellierung	124
5.3.3.1.	Ontologien	125
5.3.3.2.	Workflows	126
5.4.	Herleitung des Verfahrens zur Szenariengenerierung	128
5.4.1.	Rahmendaten	129
5.4.2.	Erzeugung	130
5.4.3.	Datenformat	131

6. Implementation der Lösungskonzepte	133
6.1. Heuristik zur Bestimmung des theoretischen Optimums	133
6.1.1. Architektur und Datenmodell	134
6.1.2. Einbindung der mathematischen Modelle	134
6.1.3. Algorithmen	136
6.1.3.1. Überperiodische Produktionsplanung ohne Transporte . .	136
6.1.3.2. Überperiodische Produktionsplanung mit Tourenzuweisung	136
6.1.3.3. Innerperiodische Sequenzierung und Routenplanung	137
6.1.3.4. Innerperiodische integrierte Planung	139
6.1.4. Graphische Benutzerschnittstelle	139
6.2. Multiagentensystem zur praxisorientierten kooperativen Planung	142
6.2.1. Architektur des Multiagentensystems	143
6.2.2. Ablaufsteuerung durch Workflows	143
6.2.2.1. Interne Workflows	144
6.2.2.2. Externe Workflows	145
6.2.3. Abbildung des VMI-Prozesses auf Workflows	145
6.2.3.1. OEMPlanning	146
6.2.3.2. CalculatePartRequest	146
6.2.3.3. NoncommittalForecast	147
6.2.3.4. Production	148
6.2.3.5. InventoryWithdrawal	148
6.2.3.6. SubmitInventoryLevel	148
6.2.3.7. LSPPlanning	149
6.2.3.8. CallForInterPeriodPlanningProposal	150
6.2.3.9. CalculateTour	151
6.2.3.10. CommunicateInterPeriodAlternative	151
6.2.3.11. Innerperiodische Workflows	152
6.2.3.12. PartsExchange	152
6.2.4. Ontologien	153
6.2.5. Implementierung der Simulationssteuerung	154
6.2.6. Implementierung der Planungsentitäten	156
6.3. Ergebnisse	160
6.3.1. Aufbau des Szenarios	160
6.3.1.1. Bedarfe	160
6.3.1.2. Standorte	161
6.3.2. Ergebnisse der sukzessiven Planung	162
6.3.3. Ergebnisse der integrierten Planung	163
6.3.4. Ergebnisse der dezentralen Planung	164
6.3.5. Variation des Szenarios	165
6.3.6. Fazit	166
6.4. Gedanken zur praktischen Umsetzung	166
7. Zusammenfassung und Ausblick	169

A. OPL-Modelle	171
A.1. Integriertes Losscheduling- und Tourenplanungsproblem (IVRLSP)	171
A.2. Capacitated Lot Sizing Problem mit Transportrestriktion	180
A.3. Lot Scheduling-Problem	182
A.4. Tourenzuweisungsproblem	184
A.5. Vehicle Routing-Problem mit Zeitfenstern	186
A.6. Capacitated Lot Sizing Problem mit Tourenplanung	190
A.7. Integriertes Tourenplanungs- und Lot Scheduling-Problem	194
B. XML-Format für Szenarien	201
Literaturverzeichnis	205

Abbildungsverzeichnis

1.1. Veränderungen in der Netzwerkstruktur durch steigenden Ölpreis	2
2.1. Periodenübergreifende Wechselwirkung von Produktion und Transport . .	17
2.2. Innerperiodische Wechselwirkung von Produktion und Transport	20
3.1. Bestimmung der optimalen Losgröße	30
3.2. Klassischer Bestellprozess	54
3.3. Belieferungsform VMI als Prozess	55
5.1. Implementation der reihenfolgeabhängigen Rüstzeit im CSLPSD	84
5.2. Big Bucket-Planung und Abholzeitfenster	94
5.3. Abnehmer-zentrierte Sicht	112
5.4. Lieferanten-zentrierte Sicht	113
5.5. Spediteur-zentrierte Sicht	113
5.6. Neuer kooperativer VMI-Prozess	115
5.7. Verhandlungsablauf	118
5.8. Tabu-Suche zur Alternativenauswahl	122
6.1. Klassendiagramm des Datenmodells der Heuristik	135
6.2. Die Benutzerschnittstelle des IVRLSP-Optimierungsprogramms	141
6.3. Visualisierung von Prognosen und Losen	142
6.4. Vererbungsstruktur der Agenten	144
6.5. Aufbau externer Workflows	146
6.6. Mapping der Workflows auf den koordinierten VMI-Prozess	147
6.7. Workflow OEMPlanning	148
6.8. Workflow CalculatePartRequest	149
6.9. Workflow NoncommittalPartRequest	150
6.10. Workflow Production	151
6.11. Workflow LSPPlanning	152
6.12. Workflow CallForInterPeriodPlanningProposal	153
6.13. Workflow CommunicateInterPeriodAlternative	154
6.14. Workflow PartsExchange	155
6.15. GUI des SimAgent	157
6.16. GUI des Abnehmer-Agenten	158
6.17. GUI eines Lieferanten-Agenten	158
6.18. GUI des Spediteur-Agenten	159
6.19. Geographische Standorte der Akteure	162

6.20. Einbindung des Supply Chain-Orchestrators	167
---	-----

Tabellenverzeichnis

3.1. Symbole des CLSP	36
3.2. Zusätzliche Symbole des DLSP	38
3.3. Zusätzliche Symbole des GLSP	40
3.4. Symbole des VRP	45
3.5. Zusätzliche Symbole des VRPTW	46
5.1. Symbole des mathematischen Modells	79
5.2. Zusätzliche/geänderte Symbole des CLSP-T	96
5.3. Zusätzliche/geänderte Symbole des Lot Scheduling	97
5.4. Zusätzliche/geänderte Symbole des VRPTW	101
5.5. Zusätzliche/geänderte Symbole des CLSP-TC	103
5.6. Zusätzliche Symbole des IVRLS	107
6.1. Laufzeiten des IVRLSP-Modells	134
6.2. Stücklisten der Szenarien-Produkte	161
6.3. Eigenschaften der internen Teile	162
6.4. Eigenschaften der Lieferanten	163
6.5. Ergebnisse der sukzessiven Planung	163
6.6. Ergebnisse der integrierten Planung, 3 LKW	164
6.7. Ergebnisse der integrierten Planung, 4 LKW	164
6.8. Gegenüberstellung der Ergebnisse	165

Abkürzungsverzeichnis

APS	Advanced Planning and Scheduling
CLSP	Capacitated Lot Sizing Problem
DLSP	Discrete Lot Sizing Problem
GLSP	Generalized Lot Sizing Problem
IVRLS	Integrated Vehicle Routing Lot Scheduling
IVRLSP	Integrated Vehicle Routing Lot Sizing Problem
JADE	Java Agent Development Framework
JiS	Just-in-Sequence
JiT	Just-in-Time
LDL	Logistikdienstleister
LKW	Lastkraftwagen
LLZ	Lieferanten-Logistikzentrum
LS	Lot Scheduling
MAS	Multiagentensystem
MRP	Material Requirement Planning
MRP II	Manufacturing Resource Planning
MSS	Multi Site Scheduling
OEM	Original Equipment Manufacturer
PLSP	Proportional Lot Sizing Problem
SCM	Supply Chain Management
VDA	Verband der Automobilindustrie
VMI	Vendor Managed Inventory
VRP	Vehicle Routing Problem
VRPTW	Vehicle Routing Problem with Time Windows

1. Einleitung

Seit den Anfängen der Automobilproduktion haben sich die dafür genutzten Produktionssysteme wesentlich gewandelt. In der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts wurde eine hohe vertikale Integration angestrebt. Am deutlichsten zeigt sich dies am Ford River Rouge Complex. Ausgestattet mit Schiffsdocks, über 100 km Eisenbahnlinie und eigenem Elektrizitätskraftwerk, konnte diese einzelne Anlage Rohstoffe in fertige Automobile transformieren (vgl. [ohn40]). Heute ist die Fertigungstiefe vieler Hersteller unter 50%¹ gesunken und der Rest der Wertschöpfung wurde in die Supply Chain verlagert. Dies ist kein kurzfristiger Trend, sondern spiegelt die Strukturveränderungen in der Industrie wider. Die Gründe dafür liegen hauptsächlich in der höheren Effizienz durch die Konzentration auf Kernkompetenzen und der Auslagerung der übrigen Tätigkeiten. Folglich entstand eine Vielzahl von Lieferanten, die sich geographisch über die ganze Welt verteilen. Es kommt zur räumlichen und planerischen Trennung der Produktionsstufen und es entsteht die Notwendigkeit, dass voneinander unabhängige Unternehmen, anstatt Werke bzw. Abteilungen eines einzelnen Unternehmens, eng zusammenarbeiten. Daraus ergeben sich zwei Konsequenzen. Zum einen ist die Koordination der Wertschöpfungskette, im Extremfall vom Rohstofflieferanten bis zum Automobilhersteller, effizient zu gestalten, um im Wettbewerb bestehen zu können. Zum anderen ist dadurch und zusätzlich durch neue Produktionskonzepte das Transportvolumen stetig gestiegen und es bedarf angesichts der steigenden Transportpreise, des zunehmenden Verkehrsaufkommens und des wachsenden Umweltbewusstseins einer integrierten Sicht auf Produktion und Logistik, um die Supply Chain als Ganzes effizient zu steuern.

Die Arbeit in diesem Bereich fand bisher zumeist im strategischen Bereich statt. Ein anschauliches Beispiel wird von Gosier et al. gegeben (vgl. [GSLWB08]). In diesem Fall besitzt ein Unternehmen fünf Verteilzentren in den Vereinigten Staaten, um Kunden in-

¹Für die deutsche Automobilindustrie wird der Wertschöpfungsanteil der Lieferanten im Jahr 2009 auf 75% geschätzt (vgl. [Ver09, S. 69]).

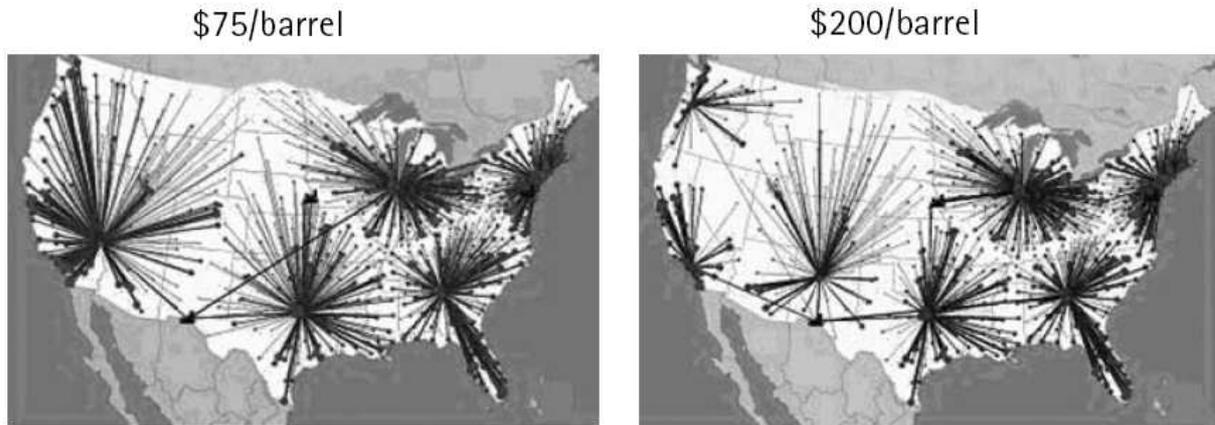


Abbildung 1.1.: Veränderungen in der Netzwerkstruktur durch steigenden Ölpreis [GSLWB08, S. 5]

nerhalb des Landes² zu versorgen; dabei wird von einem Ölpreis von \$75 ausgegangen. Bei einem Preis von \$200³ ergibt sich, dass sieben Verteilzentren eingerichtet werden sollten, da so die Wege zu den Kunden kürzer werden und die Einsparungen für den Transport die zusätzlichen Ausgaben für neue Verteilzentren übertreffen (vgl. Abb. 1.1). Dabei sind Kosten durch strengere Umweltgesetze und Mautgebühren noch nicht berücksichtigt.

Zwar werden viele Fortschritte bei der Kostenreduktion durch technische Maßnahmen, vor allem sparsamere Antriebe oder alternative Brennstoffe, erzielt, dennoch sind innerhalb der strategisch geplanten Netzwerke auch neue operative Planungsmethoden notwendig, um die gewandelten Anforderungen unter sich verändernden Rahmenbedingungen zu erfüllen; einige Autoren sprechen gar schon von einer „Neuerfindung“ der Logistik [Bre09, S. 73]. Traditionell war der Transport auf einen möglichst effizienten Produktionsbetrieb ausgelegt, um die als hauptsächliche Verschwendung im Sinne der Prinzipien des Lean Manufacturing identifizierten Bestände zu reduzieren. Diese Betrachtungsweise wird zusätzlich auch dadurch gestützt, dass die Umwelt ein freies Gut darstellt und keine Kosten durch Beanspruchung verursacht. In den letzten Jahren haben sich langsam neue Prioritäten herausgebildet, die auf die bereits angesprochenen Änderungen in der Kostenstruktur zurückzuführen sind. Martin Christopher von der Cranfield School of Management stellt fest: „The cost of making things has never been as low and it is getting lower. But the cost of moving things has never been as high and it is getting higher.“ [Ora08, S. 11]. Der Fokus verschiebt sich langfristig von Just-in-Time-Belieferung und maximaler Trans-

² ohne Alaska und Hawaii

³ Der Rohölpreis erreichte gemessen am OPEC Basket sein bisheriges Maximum im Juli 2008 bei \$131, im März 2009 betrug er \$46 [Min09, S. 78].

portgeschwindigkeit zu langsameren und günstigeren Transporten, die eine höhere Kapazitätsauslastung aufweisen. Berater empfehlen schon jetzt „mehr und größere Lager, die regelmäßig und auf Vorrat beliefert werden“ [KK08, S. 111], um Fahrten zu sparen und die Auslastung zu erhöhen. Bretzke fordert sogar eine Vergrößerung der zeitlichen Flexibilität bei der Disposition von Transporten, um durch die einhergehende Entkopplung den verfügbaren Laderaum besser auszunutzen, beispielsweise durch vorgezogene Bestellpunkte, die sich nicht mehr nur an den Beständen, sondern auch an den Transportkapazitäten orientieren [Bre09, S. 85ff].

Ebenso wenig sollte es allerdings Ziel sein, Bestände aufzubauen. Vielmehr soll analysiert werden, warum schlecht ausgelastete Transporte durchgeführt werden und wie Abhilfe geschaffen werden kann. Bestände und Transporte sollen dabei integriert betrachtet werden, sodass, wenn Bestände sich positiv auf die Transportplanung auswirken, dies auch erkannt wird. Um aber beides im Blick zu haben, ist eine Zusammenarbeit aller Beteiligten notwendig. Eine solche Kooperation geht über die heute eingesetzten Verfahren hinaus, die darauf abzielen, Teilbereiche zu optimieren, und das Gesamtziel weder berücksichtigen, noch sich dessen überhaupt bewusst sind. Diese kaskadierende oder sukzessive Planung ist schon häufig als wesentlicher Schwachpunkt genannt und der Nutzen abgestimmter Planung herausgehoben worden, jedoch meist ohne explizit auf den Transport als Bindeglied zwischen den Produktionsstufen einzugehen: „Versandplanung und Versandabruf werden geplant, ohne die Optimierung der Transporte bzw. der Transportprozesse zu berücksichtigen.“ [Geh07, S. 26]. Gerade hier besteht aber in Zukunft erhöhter Handlungsbedarf.

Wenn nun die Beteiligten kooperieren sollen, dann spielt der Logistikdienstleister eine besondere Rolle, ist er doch heute „der einzige Netzwerkpartner, der von anderen Unternehmen beplant wird, ohne dass seine Kapazitätsrestriktionen berücksichtigt würden“ [Sto07a, S. 79]. Wie später noch gezeigt wird, existieren mehrere aus der Produktionsplanung resultierende Einflussfaktoren, die die Güte der Transportplanung bestimmen. Die vorliegende Arbeit soll zeigen, wie Produktions- und Transportplanung voneinander abhängig sind, welche Verbesserungen möglich sind und wie die angesprochene Kooperation ausgestaltet werden kann.

Kooperation kann vielfältig verstanden werden und reicht von der Vereinbarung gemeinsamer Schnittstellen und Datenformate über strategische Zielvereinbarungen bis zur operativen Produktions- und Transportfeinplanung und kann grundsätzlich horizontal, also zwischen Unternehmen der gleichen Stufe in der Supply Chain, als auch vertikal, also

zwischen Käufer und Verkäufer, stattfinden. Im Fokus dieser Arbeit steht die Kooperation zur planerischen Koordination einer zweistufigen Lieferkette der Automobilindustrie unter der Beteiligung einer Menge von Lieferanten und eines Logistikdienstleisters. Im Sinne der Praxisorientierung ist zu berücksichtigen, dass Unternehmen aus verschiedenen Gründen kooperativen Verfahren gegenüber sehr zurückhaltend sind: nur 7% der in einer Studie des Softwareherstellers Oracle befragten Unternehmen dachten 2008 daran, verbesserte Kooperationsmethoden einzuführen [Ora08, S. 5]. Nicht zuletzt liegt dies an unterschiedlichen, teilweise gegenläufigen Interessen der Beteiligten. Lieferanten haben, bspw. ausgelöst durch reihenfolgeabhängige Rüstkosten, bestimmte Präferenzen für die Einplanung von Produktionslosen, die sich durchaus monetär auswirken können. Dazu kommt, dass Lieferanten zumeist nicht bloß an einer, sondern an vielen Supply Chains gleichzeitig beteiligt sind. Ebenso hat der Logistikdienstleister spezifische Interessen, bspw. die Verbindung von Transporten mit Anschlussaufträgen, um Leerfahrten zu vermeiden. Durch teilweise erhebliche Machtgefälle fürchten viele Unternehmen durch Kooperation an Selbstständigkeit zu verlieren und ausgenutzt zu werden.

Die bereits erwähnte Abhängigkeit von Produktion und Transport resultiert daraus, dass die Anlieferung vom Lieferanten zum Abnehmer außerhalb von Just-in-Time-Verkehren häufig über Sammeltouren organisiert wird, d.h. die Sendungen mehrerer Lieferanten, die für sich jeweils den LKW nur gering auslasten würden⁴, werden gebündelt und gemeinsam angeliefert. Dafür müssen Volumen und Gewicht der Sendungen zueinander passen; eine Aufgabe, die in der Disposition des Logistikdienstleisters gelöst werden muss, ohne dass sie die Aufträge beeinflussen könnte. Dabei weisen die Mengen bzw. Termine häufig eine gewisse Flexibilität auf, falls der Lieferant selbst für die Lagerbestandshaltung verantwortlich ist. Aus Sicht der Supply Chain wird daher aus dem Problem, optimale Losgrößen zu bestimmen, eines, das zusätzlich berücksichtigen muss, wie diese Mengen LKW zugewiesen werden und welche Routen diese LKW fahren.

Das im Folgenden betrachtete Problem setzt sich aus den Teilproblemen Losgrößenplanung und Tourenplanung zusammen. Beide Planungsprobleme sind bereits intensiv erforscht worden und existieren in zahllosen Varianten. Forschungsbedarf besteht jedoch bei der Betrachtung des Zusammenspiels im Sinne eines werksübergreifenden verteilten Produktionssystems, insbesondere wenn es dabei zu einer Kooperation unterschiedlicher Unternehmen kommt. Mehrstufige Losgrößenprobleme sind in der Literatur bekannt⁵. Da-

⁴häufig als Less-than-Truckload bezeichnet

⁵z.B. das Multi Level Capacitated Lot Sizing Problem [Tem06, S. 205]

bei werden innerbetriebliche Transporte der Zwischenprodukte von einer Produktionsstufe zur nächsten meist vernachlässigt, da sie weder zeitkritisch noch kostspielig sind. Dies ist jedoch nicht zutreffend, wenn Produktionsschritte in verschiedenen Werken koordiniert werden müssen. Betrachtungen, die diesen Umstand untersuchen, werden oft unter dem Begriff „Multi Site Scheduling“ zusammengefasst⁶. Solche Szenarien finden sich bislang insbesondere in der chemischen Industrie (vgl. [Bie07], [MM04]), da Unternehmen dieser Branche häufig gleichzeitig mehrere Werke kontrollieren, die sich gegenseitig beliefern. In diesem Fall ist die Vernachlässigung der Transporte nicht tragbar, da sie einen großen und weiter steigenden Anteil an den Gesamtkosten zur Herstellung eines Produktes ausmachen. Aber auch für die Elektronikindustrie sind schon Ansätze erprobt worden, hier durchaus unter der Beachtung von kooperierenden Unternehmen mittels agentenbasierter Ansätze (vgl. [CHC09]).

Die lange Geschichte der Arbeitsteilung, die verschiedene Gewerbe begründete und ausdifferenzierte, spiegelt sich in der Automobilindustrie wider. Nach der Einführung des Fließbandes, das jedem Arbeiter exakt definierte Arbeitsschritte zuwies, folgte die Spezialisierung der Unternehmen. Ford begann in den 60er Jahren damit, weitere Werke zu bauen und „The Rouge“ wurde verkleinert und teilweise verkauft. Genauso wie die Arbeitsschritte innerhalb einer Fabrik abgestimmt werden müssen, muss auch die Zusammenarbeit von Unternehmen auf operativer Ebene effizient gestaltet werden. Die vorliegende Arbeit leistet dazu einen Beitrag auf dem Feld des koordinierten Produktions- und Transportschulings.

⁶„Bei den in der Literatur vorgestellten Ablaufplanungsproblemen und ihren Lösungsansätzen dominieren lokale, isolierte Problemstellungen, z.B. für einen einzelnen Produktionsbetrieb. Mit Multi-Site Scheduling wird diese Sichtweise erweitert auf verteilte Produktionsstandorte und weitere Einheiten wie Lieferanten und Transportunternehmen, die insgesamt an der Erstellung eines Produkts beteiligt sind.“ [Sau02, S. 3]

2. Problemdefinition

Nachdem im einleitenden Kapitel bereits in die Problemstellung eingeführt wurde, soll sie in diesem Kapitel präzisiert und grundlegende Begriffe definiert werden. Dazu bedarf es zunächst in Abschnitt 2.1 einer Eingrenzung des Betrachtungsgegenstandes und der Spezifizierung seiner Komponenten und ihres Zusammenwirkens. In Abschnitt 2.2 findet sich die Beschreibung des durch Koordination zu nutzenden Potenzials hinsichtlich eines kostenminimalen Betriebs des Systems bestehend aus Lieferanten und Logistikdienstleister. Ebenso werden die in Theorie und Praxis auftretenden Hindernisse bei der Umsetzung aufgezeigt. Abschnitt 2.3 fasst die Ziele dieser Arbeit zusammen. Zuletzt werden in Abschnitt 2.4 die zu beobachtenden Anforderungen bezüglich des theoretischen Konzeptes und der praktischen Umsetzung formuliert.

2.1. Beschreibung des Betrachtungsgegenstandes

Viel ist darüber geschrieben worden, dass heute nicht mehr Unternehmen, sondern ganze Wertschöpfungsketten im Wettbewerb miteinander stehen (vgl. [KH02]). Eine Wertschöpfungskette oder Supply Chain „consists of all parties involved, directly or indirectly, in fulfilling a customer request. The supply chain not only includes the manufacturer and the suppliers, but also transporters, warehouses, retailers, and customers themselves.“ [CM04, S. 4]. Dementsprechend ist das Supply Chain Management „die integrierte prozessorientierte Planung und Steuerung der Waren-, Informations- und Geldflüsse entlang der gesamten Wertschöpfungskette vom Kunden bis zum Rohstofflieferanten, die folgende Ziele verfolgt: Verbesserung der Kundenorientierung, Synchronisation der Versorgung mit dem Bedarf, Flexibilisierung und bedarfsgerechte Produktion [und] Abbau der Bestände entlang der Wertschöpfungskette“ [KH02, S. 10]. Unter Planung wird die „gedankliche Vorwegnahme künftigen Geschehens durch systematische Entscheidungsvorbereitung und Entscheidungsfällung“ [Hah96, Sp. 1532] verstanden. Die integrierte Planung ist allerdings

keineswegs so etabliert wie die Definition Glauben macht. Vielmehr existieren bislang kaum Ansätze, Pläne zu erstellen, die mehr als ein Glied der Supply Chain in Betracht ziehen. Gerade der Transport, obwohl für das Funktionieren der Supply Chain von größter Wichtigkeit, hat bei der Planung bislang so gut wie keine Berücksichtigung gefunden: „Ein weiteres Faktum des heutigen Planungsprozesses ist, dass die Logistik-Dienstleister als wichtiger und auch kostenwirksamer Partner immer noch nicht in die Planung eingebunden sind“ [Geh07, S. 26]. Gehr bemängelt insbesondere die für Logistikdienstleister fehlende Möglichkeit im Sinne einer wirtschaftlichen Optimierung zu planen, was durch unzureichende Vorschauinformationen und die nicht vorhandene Möglichkeit steuernd in Prozesse einzugreifen verursacht wird. Es läge somit keine Synchronisation der operativen Planung zwischen Lieferant und Logistikdienstleister vor, vielmehr seien letztere fremdgesteuert, da OEMs und Lieferanten auch die Transportplanung innerhalb ihrer Kompetenz sehen und daher genaue Vorgaben machen. Als Beispiel für die Optimierung von Transporten wird die Steuerung des Versands eines Lieferanten genannt (vgl. [Geh07, S. 26]). Um dies zu verwirklichen, sind Verfahren notwendig, die die Restriktionen und Daten beider Planungsdomänen einbeziehen. Gegenstand dieser Dissertation ist die Herleitung eines Verfahrens, das die kostenminimale Koordination der Produktion bei Lieferanten und des Transports durch einen Logistikdienstleister unter der Annahme, dass dieser als Sammelverkehr durchgeführt wird, ermöglicht. Dabei soll dieses Verfahren theoretisch und praktisch behandelt werden. Theoretisch bedeutet, dass das Potenzial der integrierten Planung quantifiziert wird. Bei der praktischen Betrachtung wird der organisatorische Aspekt für die Umsetzung berücksichtigt.

Als Planungsdomäne soll eine Menge aus mehreren Lieferanten und einem Logistikdienstleister verstanden werden, die einen gemeinsamen OEM beliefern. Die Lieferanten bilden eine Teilmenge aller Lieferanten des OEM und gehören einem gemeinsamen geographischen Cluster an, um wirtschaftlichen Sammelverkehr zu ermöglichen. Ohne diese Voraussetzung ist keine sinnvolle Analyse der Abhängigkeiten zwischen Produktion und Transport möglich. Daher werden die Lieferanten einer Region, etwa der eines Gebietsspediteurs, ausgewählt. Ebenso erfolgt die Beachtung nur eines Logistikdienstleisters. Zum einen steht dies im Einklang mit dem Gebietsspediteurskonzept, zum anderen würden konkurrierende Logistikdienstleister das Planungsproblem wesentlich komplexer machen ohne zur eigentlichen Fragestellung beizutragen. Dies steht auch im Einklang mit bereits umgesetzten Konzepten (vgl. 3.2.1.3). Zu beachten ist, dass die reine Supply Chain, also eine konvergierende Kette von Lieferanten, die zusammenarbeiten, um ausschließlich ein

Endprodukt zu fertigen, in der Praxis nicht existiert. Vielmehr sind unzählige Supply Chains miteinander verwoben und jeder Akteur ist gleichzeitig in mehrere eingebunden. Diese Tatsache muss berücksichtigt werden, denn die Planung der Lieferanten hängt auch entscheidend davon ab, welche weiteren Bedarfe befriedigt werden müssen, da dies die verfügbare Kapazität und die präferierte Produktionsreihenfolge beeinflusst.

Im Folgenden wird der Betreiber des Standorts am endkundennahen Ende der Supply Chain „Abnehmer“ genannt. Es wird bewusst offen gelassen, ob es sich dabei um einen Automobilhersteller (OEM¹) oder einen Lieferanten² handelt. Eine Umsetzung ist beispielsweise auch für Lieferantenparks denkbar. In diesem Falle könnte sogar die sonst gewünschte empfangerreine Anlieferung³ aufgehoben werden. Außerdem gehen Automobilhersteller verstärkt dazu über, komplette Module einzukaufen, sodass die hier beschriebenen Methoden in Zukunft eventuell sogar besser für die Belieferung großer Lieferanten geeignet sind. Eßig merkt an, dass Modullieferanten vor allem auch eine „fertigungslogistische Integrationsleistung“ [Eßi08, S. 987] erbringen, d.h. die Modullieferanten haben nicht bloß die Funktion das Modul herzustellen, sondern entlasten den Abnehmer auch von der Aufgabe, für das Modul benötigte Teile zu beschaffen und die Anlieferung zu organisieren.

Die Abschnitte 2.1.1 bis 2.1.3 behandeln die Beteiligten im Einzelnen. Dabei wird aufgezeigt, welche Eigenschaften die Akteure besitzen, welche planerischen Vorgänge sie für sich selbst durchführen und welche Ziele sie dabei verfolgen. Ein unternehmerisches Zielsystem, also „die der unternehmerischen Betätigung zugrunde liegenden Zielsetzungen“ [Bet88, Sp. 2185], besteht aus mehreren in Beziehung stehenden Zielen, die durch Inhalt, angestrebtes Ausmaß der Zielerreichung und einen zeitlichen Bezug bestimmt sind (vgl. [Bet88, Sp. 2186f.]). Ziele können insbesondere im Konflikt stehen. Wichtigstes Ziel ist das Gewinnstreben, neben Sicherheitszielen, die bspw. die Liquidität sichern sollen. Zusätzlich treten immer häufiger auch ökologische Ziele hinzu. Ziele werden auf oberster Ebene definiert und nachfolgende Organisationseinheiten müssen daraus Zwischen- und Unterziele ableiten. Jeder der an der Supply Chain beteiligten Akteure hat ein individuelles Zielsystem, jedoch sind sich die von Akteuren der gleichen Rolle sehr ähnlich. Die Vereinbarung eines gemeinsamen Zielsystems wird von Kuhn und Hellingrath als wichtiger Bestandteil

¹OEM (Original Equipment Manufacturer) ist die übliche Bezeichnung für einen Automobilhersteller, der Produkte unter eigenem Namen auf den Markt bringt.

²Auch ein Lieferant, der komplette Automobile liefert, ist möglich.

³OEMs bestehen in der Regel auf einer werksreinen Anlieferung, um Priorisierungskonflikte bei Störungen zu vermeiden, in der Praxis wird dies allerdings nicht konsequent eingehalten.

eines Kooperationsabkommens genannt (vgl. [KH02, S. 65]).

2.1.1. Abnehmer

Der Abnehmer ist in der Regel das fokale Unternehmen seiner nachgelagerten Supply Chain, d.h. er ist seinen Lieferanten gegenüber in der Lage, Forderungen durchzusetzen. Es wird davon ausgegangen, dass der Abnehmer selbst ein produzierendes Unternehmen ist, wobei für die Betrachtung unerheblich ist, wie die Produktion an dieser Stelle organisiert wird. Auch das Produktionsplanungsverständnis kann weitgehend unbeachtet bleiben, da vor allem wichtig ist, dass Bedarfe existieren und dass diese durch die Lieferanten befriedigt werden müssen. Es kann unterschieden werden, ob die Bedarfsbefriedigung maßgeblich vom Abnehmer oder vom Lieferanten sichergestellt wird (vgl. 3.2).

Der für die Zielerreichung relevante Bereich des Abnehmers im Kontext dieser Arbeit betrifft den Einkauf, der die Materialversorgung nach Kosten optimiert und sicherstellt. Zu diesem Zweck ist vor allem die Lagerhaltung reduziert und in vielen Fällen komplett eliminiert und durch Just-in-Time-Belieferung (vgl. 3.2.1.1) ersetzt worden. In letzter Zeit hingegen hat auch Nachhaltigkeit an Gewicht gewonnen: „Five years ago, the dominant talk among purchasing and supply professionals was cost, value and speed. [...] Companies are now waking up to the benefits of a more sustainable approach and are beginning to consider the measures required for a sustainable supply chain.“ [Ora08, S. 5]. So sind nun „Strukturen und Prozesse im Hinblick auf ihre ökologischen Auswirkungen zu analysieren, zu bewerten und ggfs. unter Berücksichtigung von Umweltgesichtspunkten neu zu gestalten.“ [SRBHT07, S. 15]. Dazu zählt, dass „aus ökologischer Sicht die Vorratsbeschaffung der Einzelbeschaffung vorzuziehen [ist], da so das Transportaufkommen und die damit verbundenen Schadstoffemissionen reduziert werden können.“ [SRBHT07, S. 16]. Die lagerhaltige Beschaffung (vgl. 3.2.1.2) wiederum kann vielfältig gestaltet werden. Bei einer Beschaffung nach dem „Vendor Managed Inventory“-Prinzip⁴ kann beispielsweise der Abnehmer keinen direkten Einfluss auf die Anlieferung nehmen.

Die Ziele des Abnehmers lassen sich zusammenfassen als:

1. Versorgungssicherheit
2. Geringe Kosten

⁴Beim Vendor Managed Inventory (VMI) wird dem Lieferant die Verantwortung für die Lagerbestände übertragen (vgl. 3.2.1.2.2).

3. Ökologische Transporte

2.1.2. Lieferant

Lieferanten stellen eine stark heterogene Gruppe vom Teile- bis zum Systemlieferanten dar. Die Unterscheidung wird im Wesentlichen bezüglich der Komplexität des Produktes, der Übernahme von Entwicklungsleistungen und der Einbindung in Prozesse getroffen. Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit Teilelieferanten, die geprägt sind durch die Fertigung vorgegebener Teile und einer bislang geringen Einbindung in die Prozesse des Abnehmers. Ferner werden Lieferanten danach klassifiziert, an welcher Stelle im Netzwerk sie sich befinden, gemessen vom OEM. So werden Lieferanten, die den OEM direkt beliefern, als 1st-Tier bezeichnet und deren Lieferanten wiederum als 2nd-Tier.

Da für das zu entwickelnde Verfahren von Teilelieferanten ausgegangen wird, ist die hauptsächliche Planungsaufgabe bei diesen Akteuren das Bestimmen von Losgrößen und Produktionszeitpunkten. Diese Aufgaben können sehr unterschiedliche Eigenschaften haben (vgl. 3.1.1), jedoch muss in jedem Fall bestimmt werden, welche Menge eines Produktes zu welchem Termin gefertigt wird. Als exaktes Lösungsverfahren wird die mathematische Modellierung mittels Zielfunktion und Restriktionen bevorzugt, die eine Lösung über Standardverfahren wie den Simplex-Algorithmus erlaubt. Daneben existiert eine Vielzahl heuristischer Verfahren.

Der Lieferant ist wie der Abnehmer ein gewinnorientiertes Unternehmen; in diesem Fall sind die relevanten Stellen zur Zielerreichung in den Bereichen Produktion und Logistik zu finden. Die Produktion steht vor der Aufgabe, gegebene Bedarfe termingerecht und unter Beachtung einer Produktionsreihenfolge, die möglichst wenig Rüstzeit verursacht, einzuplanen. Rüstvorgänge bestehen beispielsweise aus einem Werkzeugwechsel und können abhängig davon, von welchem Produkt auf welches gerüstet wird, unterschiedlich aufwendig sein; produktiv genutzt werden kann die Maschine in dieser Zeit jedoch nicht. Rüstzeiten erzeugen auf diese Weise Opportunitätskosten (vgl. [Tem06, S. 132]). Daher werden möglichst große Lose bevorzugt, um die Anzahl dieser Vorgänge zu minimieren. Außerdem sollen sie in einer Reihenfolge stattfinden, die den Gesamtaufwand gering hält. Rüstzeiten können sehr unterschiedlich sein und reichen von wenigen Minuten bis zu mehreren Stunden. Zusätzlich profitieren Lieferanten von regelmäßigen Aufträgen über

möglichst konstante Mengen, deren Liefertermine möglichst flexibel sind („Suppliers typically want manufacturers to commit themselves to purchasing large quantities in stable volumes with flexible delivery dates“ [AKD08, S. 324]). Dies reduziert die Unsicherheit und kann zu einer besseren Planung führen. Zeitlich und quantitativ stark schwankende Abrufe führen eher zu Kapazitätsengpässen, da die Gefahr besteht, dass mehrere große Aufträge verschiedener Kunden zeitgleich eintreffen und Überstunden nötig werden, während in anderen Perioden der Auftragseingang gering ist. Das vom Abnehmer gewählte Belieferungskonzept hat starke Auswirkungen auf die Restriktionen der Planung. Wird die Anlieferung durch Abrufe koordiniert, so hat der Lieferant weniger Optimierungsspielraum als wenn er selbst für die Regelung der Bestandsmenge verantwortlich ist.

Die Ziele der Lieferanten lassen sich zusammenfassen als:

1. Effiziente Losgrößen
2. Effiziente Produktionsreihenfolgen
3. Effiziente Anlieferung (falls die Anlieferung durch den Lieferanten beauftragt wird)

2.1.3. Logistikdienstleister

Derjenige Partner in der Supply Chain, der den Transport vornimmt, ist bislang Logistikdienstleister (LDL) genannt worden. Dies ist ein abstrakter Begriff, der mehrere Konzepte umfasst (vgl. [Car08, S. 585]). Übernimmt der LDL lediglich den Transport, so wird von einem Transporteur oder Frachtführer gesprochen (HGB § 407(1)⁵). Übernimmt er weitere Dienstleistungen, u.a. die Organisation des Transports der Güter, ohne diesen selbst durchzuführen, wird er als Spediteur bezeichnet (HGB § 453(1)⁶). Allerdings kann der Spediteur auch selbst als Frachtführer in Erscheinung treten (HGB § 458⁷). In dieser Arbeit wird von diesem Fall ausgegangen und der Begriff „Spediteur“ gewählt, um die planerische Tätigkeit herauszustellen. In der Literatur wird der Spediteur meist als der schwächste Partner innerhalb der Supply Chain dargestellt. Die Position erklärt sich aus zwei Gründen. Zunächst ist die angebotene Dienstleistung des Warentransports

⁵„Durch den Frachtvertrag wird der Frachtführer verpflichtet, das Gut zum Bestimmungsort zu befördern und dort an den Empfänger abzuliefern.“

⁶„Durch den Speditionsvertrag wird der Spediteur verpflichtet, die Versendung des Gutes zu besorgen.“

⁷„Der Spediteur ist befugt, die Beförderung des Gutes durch Selbsteintritt auszuführen. Macht er von dieser Befugnis Gebrauch, so hat er hinsichtlich der Beförderung die Rechte und Pflichten eines Frachtführers oder Verfrachters. In diesem Fall kann er neben der Vergütung für seine Tätigkeit als Spediteur die gewöhnliche Fracht verlangen.“

sehr leicht austauschbar. Außerdem bestehen große Überkapazitäten (vgl. [Bun08]) am Markt, sodass Frachtführer vielfach nachteilige Konditionen und Preise akzeptieren müssen. Dies macht es für Kunden attraktiver strikte Vorgaben zu machen, die zum eigenen Vorteil gereichen, als einen Partner auszuwählen und eng in eigene Prozesse einzubinden und gegebenenfalls sogar Abläufe zu koordinieren, da jede Koordination in der Regel mit gewissen Transaktionskosten einhergeht.

Nach Domschke ist eine Tour „die Menge aller Kunden, Kanten bzw. Pfeile, die auf ein und derselben, in einem Depot beginnenden und in einem Depot endenden Fahrt bedient werden“, eine Route hingegen „die Reihenfolge, in der die Kunden einer Tour zu bedienen sind“ [Dom97, S. 206]. „Ein Tourenplan ist somit eine Menge von Touren und zugehörigen Routen, die alle Bedingungen des betrachteten Problems erfüllen“ [Dom97, S. 206], somit kann allgemein von Tourenplanung gesprochen werden ohne das Routing, bzw. das Scheduling beim Vorhandensein von Zeitfenstern, auszuschließen. Ebenso wie Losgrößenmodelle werden auch Touren- und Routingmodelle gelöst, indem sie entweder mathematisch modelliert werden und mittels exakter Verfahren das Optimum bestimmt wird oder durch Anwendung von heuristischen Verfahren.

In der Dispositionsabteilung werden die operativen Ziele definiert, die zur Gewinnmaximierung des Unternehmens beitragen. Dazu zunächst ein Blick auf die für einen Auftrag anfallenden Kosten (vgl. [Sch94, S. 25]):

- auftragsgebundene Kosten (z.B. Reinigung, Einwegpackmittel)
- einsatzzeitbezogene Kosten (z.B. Fahrerspesen, Überstundenvergütung)
- streckenbezogene Kosten (z.B. Maut)
- entfernungsabhängige Kosten (z.B. Kraftstoffverbrauch)

Für den Spediteur gibt es vier maßgebliche Ziele, um die Kosten zu minimieren. Vorrangig ist die Kapazitätsauslastung, denn bei einem voll beladenen LKW können die Fixkosten besser verteilt werden. Neben einer hohen Auslastung wird außerdem angestrebt, auch die Längen der resultierenden Routen zu minimieren, um die Aufträge möglichst schnell durchzuführen. Weiterhin versuchen die Disponenten, soweit es sich um ungebrochenen Verkehr bzw. um einen Hauptlauf handelt, Aufträge zu finden, die sich an die Entladung beim Abnehmer anschließen, um Leerfahrten zu vermeiden (vgl. [Pan02, S. 35], [Bre08,

S. 99]). Zuletzt ist es wichtig, Standzeiten beim Entladen zu vermeiden, weil währenddessen zwar die einsatzzeitbezogenen Kosten anfallen, jedoch keine Einnahmen gemacht werden⁸.

Der Spediteur hat, sofern noch keine Emissionsabgaben für den Straßentransport eingeführt wurden, keine direkten ökologischen Ziele. Allerdings steht der Transport als einer der Hauptverursacher von CO_2 -Emissionen unter besonderer Beobachtung der Öffentlichkeit, sodass besonders ineffiziente Unternehmen durchaus einen Imageschaden erleiden können. Langfristig kann auch ein bedeutsamer Wettbewerbsvorteil entstehen, wenn ein Unternehmen Expertise in der ökologischen Bewertung, Planung und Durchführung von Transporten aufbauen kann.

Die Ziele des Spediteurs lassen sich zusammenfassen als:

1. Hohe Fahrzeugauslastung / effiziente Touren
2. Kurze Routen
3. Verbindung mit Anschlussaufträgen
4. Vermeidung von Standzeiten

2.1.4. Koordination von Lieferanten und Logistikdienstleister

Die zuvor vorgestellten Planungsverfahren der Beteiligten werden zumeist unabhängig voneinander angewandt. Dadurch erfolgt eine Sukzessivplanung, die zwar lokale Optima erzeugt, jedoch keinen gesamtoptimalen Plan (vgl. [Dan09, S. 7]). Um dem entgegenzuwirken, wird von Koordination der Teilsysteme gesprochen. Im Kontext der Supply Chain wird unter der Tätigkeit Koordinieren „properly combining (relating, harmonising, adjusting, aligning) a number of objects (actions, objectives, decisions, information knowledge, funds) for the the achievement of the chain goal“ [SWS02, S. 291] verstanden, sodass in Folge dieser Handlungen ein Zustand erreicht wird, in dem „the behaviour of all involved partners results in an improved plan for the overall supply chain compared to an initial or default situation“ [Sta09, S. 2]. Die Definition der Koordination erfasst also mehr als bloß die planerische Koordination, auf diesen Aspekt sei aber die weitere Betrachtung

⁸Auf Grund der vielen eintreffenden LKW kann es u.U. mehrere Stunden dauern, bevor ein LKW abgeladen ist und das Gelände wieder verlassen kann. Zwar zahlt der Auftraggeber eine gewisse Entschädigung nach HGB § 412(3), doch ist der Frachtführer eher an einer schnellen Abfertigung interessiert.

beschränkt. Im Weiteren wird zusätzlich der Begriff Kooperation verwendet. Dieser bezeichnet den Willen zweier oder mehr Partner, eine bewusste Koordination in Abgrenzung zur Koordination durch Märkte oder Hierarchien (vgl. [Dia05, S. 12]) zu erreichen. Kooperation wird daher verstanden als „the conscious, explicitly arranged collaboration that can be dismissed anytime by one collaborating partner“⁹ [Rot93, S. 13], [Kno97, S. 35]. Kooperation ist somit Voraussetzung für Koordination. Die Bereitschaft aller Beteiligten zur Kooperation wird als gegeben angenommen.

Im Speziellen befasst sich diese Arbeit mit der Koordination von Lieferanten und Spediteur für die Belieferung lieferantengesteuerter Lager. Lieferantengesteuert bedeutet, dass die Verantwortlichkeit für die Disposition des Lagers vom Abnehmer auf den Lieferanten übertragen wurde (vgl. 3.2.1.2.2). Der Zweck ist die Entkopplung der Fertigungsprozesse von der Entnahme im Lager. Mittels der so genannten Lieferanten-Logistikzentren (LLZ) können die Lieferanten die Belieferung und damit die Produktion innerhalb vereinbarter Bestandsmengen autonom auf Basis von Prognosen und übermittelten Entnahmen vornehmen. Im Gegensatz zu verbindlichen Abrufen ermöglicht dies dem Lieferanten das Optimieren von Losgrößen und Bereitstellungsterminen (vgl. [Gra07, S. 438]), je nach gewählter Methode durchaus auch unter Berücksichtigung der Transportkosten, denn auch die Beauftragung des Transports obliegt in diesem Falle dem Lieferanten. Solange aber keine Vollladungen erreicht werden, wird auf Grund der Unkenntnis der Transportmengen benachbarter Lieferanten mit großer Wahrscheinlichkeit kein gesamtoptimales Ergebnis erzielt, weil die Sendung Teil einer Sammeltour wird, deren Auslastung ungewiss ist. In der heutigen Praxis findet in dieser Beziehung keine Koordination statt, denn der Spediteur kann keinen Einfluss auf die Aufträge des Lieferanten nehmen. Somit liegen Optima hinsichtlich der Produktionsplanung der Lieferanten sowie der Transportplanung des Speditors unter Maßgabe der aus der Produktionsplanung resultierenden Mengen und Termin vor, es ist aber nicht davon auszugehen, dass diese Lösungen auch das Gesamtoptimum darstellen.

Zur gleichzeitigen Verbesserung sowohl der Produktionsplanung der Lieferanten als auch der Anlieferung bei lagerhaltiger Beschaffung ist Koordination unerlässlich. Hat der Lieferant die Kontrolle über Lagerbestände, ergeben sich Vorteile bei der Losbildung, aber der Transport kann nur aus Sicht eines einzelnen Lieferanten optimiert werden; bei Beschaffung durch abnehmerseitige Abrufe kann der Abnehmer zusätzlich zur Bestandsoptimie-

⁹Der Begriff Kollaboration wird auf Grund der negativen Konnotation im Deutschen vermieden.

rung auch den Transport berücksichtigen, allerdings wird es für den Lieferant schwieriger, die Produktion effizient zu organisieren. Im Sinne einer Gesamtoptimierung, die direkt oder indirekt allen Beteiligten nutzt, müssen Wege aufgezeigt werden, die diesen Konflikt lösen.

2.2. Koordinationsbedarf zwischen Produktion und Distribution

Im Kontrast zur Theorie des Supply Chain Managements agieren die meisten Unternehmen sehr selbstbezogen und ziehen die Anforderungen und Restriktionen ihrer Lieferanten, Spediteure oder weiterer an der Supply Chain beteiligter Unternehmen im Sinne einer Koordination nicht in die eigene Planung mit ein. Insbesondere der Transport spielt bisher eine untergeordnete Rolle, da er im Bereich der Automobilindustrie im Jahr 2003 lediglich Kosten in Höhe von 2,1% des Umsatzes ausmachte [Vah05, S. 44]. Bereits mittelfristig wird der Anteil jedoch steigen, jedenfalls lässt dies der Blick auf die Ölpreisentwicklung der letzten Jahre vermuten. Wie bereits in Kapitel 1 gezeigt, wird dies Auswirkungen auf die Struktur von Logistiksystemen haben, aber auch ihre Steuerung wird sich verändern. So führen die heutigen isolierten Planungssysteme zu suboptimalen Transporten im Teilladungsverkehr, da die Liefermengen nicht aufeinander abgestimmt sind und so teilweise eine Sendung eines Lieferanten auf zwei verschiedenen Wegen angeliefert wird. Dies erzeugt nicht nur höhere Kosten durch den Fahrzeugeinsatz, sondern auch durch die notwendige Disposition. Dieses Problem tritt auf, wenn ein Produktionsstandort direkt oder indirekt über einen Sammelgutverkehr beliefert wird. Im Handel besteht ein ähnliches Problem, sodass sich Gruppen von Konsumgüter- und Tiefkühlwarenherstellern zusammengeschlossen haben, um eine gebündelte Anlieferung zu erreichen (vgl. [Zen08]).

Die Grundannahme dieser Arbeit ist, dass durch die Entkopplung der Planung von Produktion und Transport das Produktionssystem als Ganzes bestehend aus Lieferanten und Spediteur suboptimal betrieben wird. Vorausgesetzt, dass diese Aussage richtig ist, müssen sich also Produktion und Transport gegenseitig beeinflussen. In den folgenden zwei Unterpunkten wird aufgezeigt, welche Beziehungen zwischen den beiden Planungsdomänen sich sowohl bei der Betrachtung auf Tagesbasis, als auch bei der Betrachtung untertägiger Sequenz- und Routenplanung finden.

Alle Beteiligten haben, da sie Teil einer gemeinsamen Wertschöpfungskette und somit aufeinander angewiesen sind, auch gemeinsame Interessen. Allein die Umsetzung gestaltet sich oft schwierig, da sie mit Einzelinteressen konkurrieren, die dazu notwendigen Methoden nicht verfügbar sind oder auf Grund von Misstrauen nicht eingesetzt werden.

Die gemeinsamen Ziele umfassen:

- Konkurrenzfähiger operativer Betrieb der Supply Chain
- Ökologische Effizienz
- Kooperation ohne die Gefahr, dadurch benachteiligt zu werden

2.2.1. Periodenübergreifende Betrachtung

Es wurde bereits ausgeführt, dass die Übertragung der Verantwortung für die Teileverfügbarkeit auf den Lieferanten es diesem erlaubt, Größe und Fertigungstermine der Lose eigenverantwortlich zu optimieren. Jedoch fehlt dadurch nun die umfassende Sicht, die es aus der Perspektive des Abnehmers erlauben würde, Transporte zusammenzufassen.

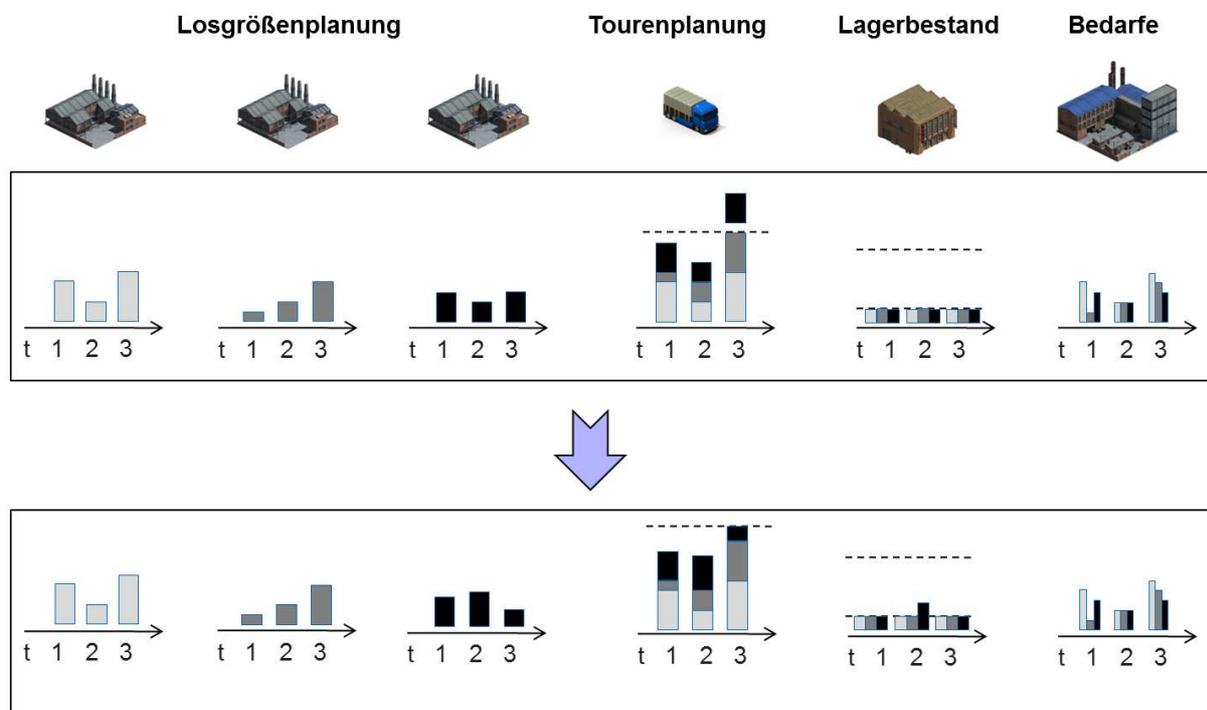


Abbildung 2.1.: Periodenübergreifende Wechselwirkung von Produktion und Transport

Abbildung 2.1 demonstriert beispielhaft die periodenübergreifende Wechselwirkung zwischen Produktion und Transport. Sie zeigt drei Lieferanten, einen Spediteur und einen Abnehmer mit Beständen in einem lieferantengesteuerten Lager und Bedarfen. Zunächst bestimmen die Lieferanten ohne Abstimmung die Losgrößen in den Perioden 1 bis 3 unter Beachtung der Bedarfe und der Mindest- und Maximalbestände im abnehmernahen Konsignationslager. Anschließend versucht der Logistikdienstleister die Lieferungen in Sammeltouren zusammenzufassen, wobei in Periode 3 auf Grund von Kapazitätsrestriktionen zwei LKW eingesetzt werden müssen. Über den gesamten Planungshorizont gesehen würde allerdings ein LKW pro Periode genügen, wenn die Mengen anders verteilt wären. Die Transportplanung kann aber für jeden Tag nur über die Menge der an diesem Tag zur Abholung bereitgestellten Lieferungen optimieren. Ein einzelner Lieferant kann ohne Koordination dabei nicht berücksichtigen, welche Auswirkungen seine Bereitstellung auf den Transport hat¹⁰. Schon die geringe Umverteilung von Mengen kann den Einsatz eines zweiten LKW unnötig machen, wenn zuvor die Ladungskapazität nur geringfügig überschritten wurde. Das Problem, dass Sendungen sich nicht zu vollausgelasteten Touren zusammenstellen lassen, tritt in der Praxis häufig auf¹¹ und stellt den Disponenten vor das Problem, die Abholung effizient zu organisieren und ggfs. eine Lieferung durch zwei LKW abholen zu lassen, wodurch Nachteile für den Spediteur als auch den Lieferanten entstehen. Ist es unter Einhaltung aller Randbedingungen, also der verfügbaren Produktionskapazität bzw. der Bereitstellungstermine anderer Aufträge, möglich das Los nach Menge und Periode so einzuplanen, dass möglichst gut ausgelastete Transporte die Folge sind, können alle Beteiligten davon profitieren. Im Beispiel resultiert aus der angepassten Planung ein geringfügig höherer Bestand, aber ein LKW wird gespart.

2.2.2. Innerperiodische Betrachtung

Stehen die Produktions- und Liefertermine sowie die Liefermengen fest, so muss noch die Route bestimmt werden, die ein LKW fährt, um die Waren einzusammeln. Das grobe Ziel ist es, die Weglänge zu minimieren, um Kosten zu sparen. Dabei werden implizit auch öko-

¹⁰Dies gilt selbstverständlich nur für Teilladungsverkehre.

¹¹nach Aussage der DB Schenker AG; vgl. außerdem „Aufgrund der täglich schwankenden Anzahl an Sendungen sowie ihrer Größe kann es vorkommen, daß ein Fahrzeug die für sein Tourgebiet vorgesehenen Sendungen aufgrund kapazitiver oder zeitlicher Restriktionen nicht bewältigen kann. In diesem Fall muß der Disponent einzelne Sendungen zwischen den Tourgebieten so verschieben, daß möglichst alle Sendungen zugestellt werden können. Kann er das nicht durch den Austausch von Sendungen erreichen, muß ein zusätzliches Fahrzeug eingesetzt werden.“ [Wlc98, S. 46]

logische Ziele verfolgt, da sich die CO_2 -Emissionen proportional zum Verbrauch verhalten. Kürzeste Wege müssen allerdings nicht in jedem Fall die günstigste Lösung darstellen, da einzelne Streckenabschnitte beispielsweise eine hohe Steigung aufweisen können und damit mehr Energie zum Befahren benötigen. Ebenso könnten Strecken bekannt sein, auf denen viel Stop&Go-Verkehr, durchgängig verursacht durch Ampeln oder zeitweise verursacht durch Stau, auftritt.

Die zu beachtenden Randbedingungen sind vor allem die Ladekapazitäten in Form von Volumen und Gewicht, sowie die Bereitstellungszeitpunkte bei den Lieferanten. Ein Bereitstellungszeitpunkt gibt an, wann innerhalb des Tages der Lieferant angefahren und die Waren eingeladen werden können. Er stimmt entweder mit dem Arbeitsbeginn überein, wenn die Waren bereits auf Lager liegen, oder mit dem Fertigstellungszeitpunkt des Produktionsloses, wenn Produktion und Transport in derselben Periode stattfinden¹². Die Bereitstellungstermine wiederum hängen von der Produktionssequenz des Lieferanten ab, d.h. den Start- und Endzeitpunkten der Produktion der Lose. Damit wird die Menge der unter Beachtung der aus den Bereitstellungszeitpunkten resultierenden Zeitfenster möglichen Routen maßgeblich durch die Produktionssequenz bestimmt.

Das Beispiel in Abbildung 2.2 verdeutlicht den Zusammenhang. Es zeigt drei Lieferanten und einen vierundzwanzigstündigen Ausschnitt aus deren Fertigungssequenz. Zwischen den Losen ist jeweils die Rüstzeit berücksichtigt. Damit stehen die frühesten Abholtermine fest. Für die Spediteur wurde die Arbeitszeit auf die Spanne von acht bis siebzehn Uhr festgelegt. Aufbauend darauf wird die kürzeste Strecke ermittelt, die zur Abholung gefahren werden kann. Die Strecke $OEM \rightarrow ZL\ 1 \rightarrow ZL\ 2 \rightarrow ZL\ 3 \rightarrow OEM$ ist 410 km lang. Eine kürzere Strecke ist mit den gegebenen Zeitfenstern nicht möglich. Stellt allerdings Lieferant 3 seine Produktionsreihenfolge so um, dass das abzuholende Los als erstes gefertigt wird, so ergeben sich andere Zeitfenster, die die Tour $OEM \rightarrow ZL\ 3 \rightarrow ZL\ 1 \rightarrow ZL\ 2 \rightarrow OEM$ ermöglichen. Die Rüstkosten bleiben, unter der Annahme, dass sie symmetrisch definiert sind und unter Vernachlässigung des initialen oder vorhergehenden Rüstzustands, gleich und die Tourlänge verkürzt sich um etwa ein Drittel auf 260 km. Zusätzlich bekommt der Spediteur etwas Spielraum, um Anschlussaufträge zu akquirieren, da die Tour früher abgeschlossen ist.

¹²Dabei wird angenommen, dass keine Teilmengen von Produktionslosen transportiert werden.

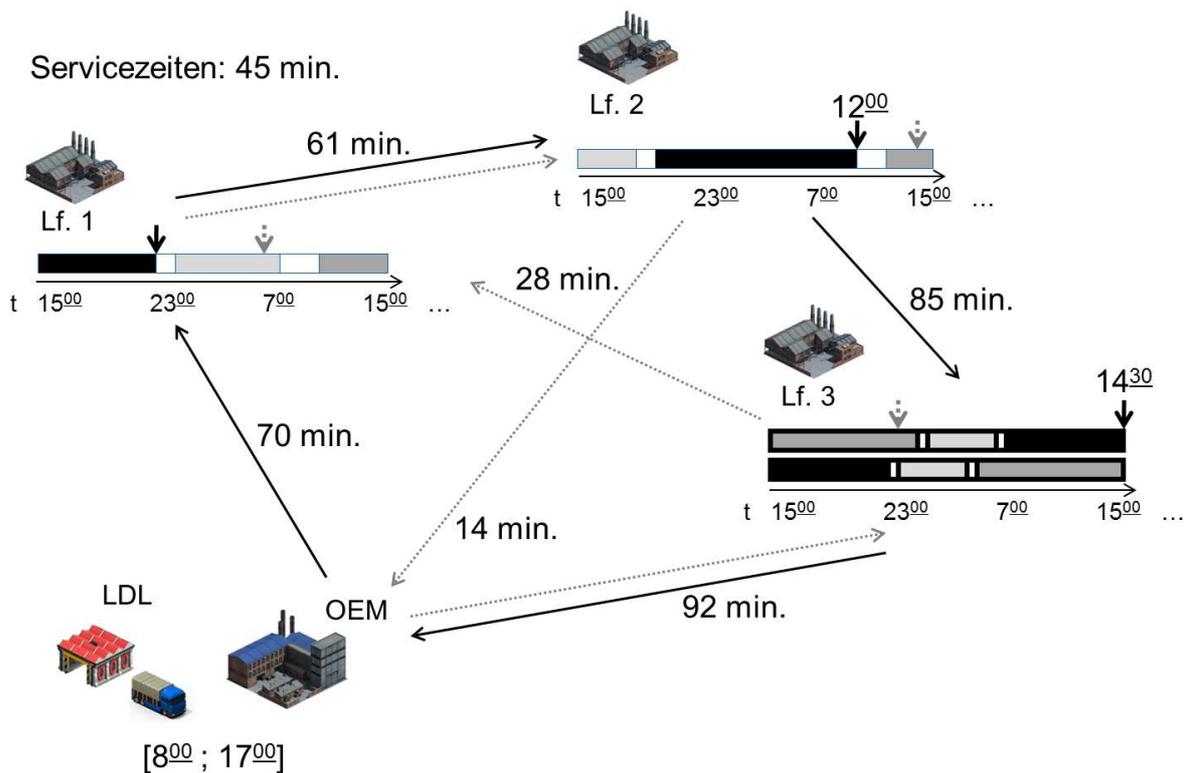


Abbildung 2.2.: Innerperiodische Wechselwirkung von Produktion und Transport

2.2.3. Koordinationshindernisse in der Theorie

Die existierende Literatur zum Supply Chain Management geht grundsätzlich von einem positiven Effekt durch die Umsetzung des Gedankens partnerschaftlicher Kooperation und einhergehender Koordination (vgl. [KH02] u.a.) aus. Dennoch ist die oft skizzierte Vision einer solchen Lieferkette selten in der Praxis anzutreffen. Dafür sind auch fehlende theoretische Grundlagen verantwortlich. Nachfolgend werden drei Hindernisse beschrieben.

Es ist festzuhalten, dass sich das Verständnis des Supply Chain Managements aus einer strategischen Betrachtung heraus entwickelt hat. Operative koordinierende Planungsverfahren stehen in Anzahl und Vielfalt weit hinter denen zur innerbetrieblichen Planung zurück. Somit fehlen quantitative Resultate aus Testszenarien, die den Entwicklungs- und Umsetzungsaufwand entsprechender Verfahren an Hand der nachgewiesenen Optimierungspotenziale rechtfertigen. Zudem können ohne diese Grundlagen keine Prozesse und IT-Systeme entwickelt werden, die in der Lage wären dieses umzusetzen.

Fehlende Prozesse sind daher das nächste Hindernis. Integrierte Prozesse zwischen Un-

ternehmen sind für ein funktionierendes Supply Chain Management von entscheidender Bedeutung. Neben dem traditionellen Lieferabruf oder neuen Konzepten wie dem Vendor Managed Inventory oder KANBAN gibt es keine Prozesse, die eine Koordination einschließlich des Transports definieren. Ein solcher Prozess ist aber notwendig, um die Zusammenarbeit der Unternehmen organisieren zu können. Ohne einen strukturierten und eindeutigen Prozess endet die Zusammenarbeit in unzusammenhängenden Ad-hoc-Prozessen, die kaum mehr überschaubar bzw. effizient durchführbar sind.

Die fehlenden Prozesse wiederum verhindern den Einsatz von IT-Systemen. Der Entwurf von Softwarekomponenten, ohne die die Durchführung von Geschäftsprozessen undenkbar ist, kann nur gelingen, wenn dazu ein präziser Anforderungskatalog aufgestellt wurde. Dieser ist aber nicht verfügbar, weil weder Ein- noch Ausgabewerte definiert sind. Ein weiteres Hindernis in Bezug auf IT-Systeme ist die ungeklärte Frage, ob der durch Koordination erheblich höhere Kommunikations- und Planungsaufwand durch menschliche Disponenten erfolgt oder an ein automatisiertes Verfahren übertragen wird. Dazu fehlen empirische Untersuchungen, die einen Effizienzvergleich anstellen bzw. den Arbeitsaufwand quantifizieren.

2.2.4. Koordinationshindernisse in der Praxis

Auch aus Sicht der Praxis bestehen Hindernisse, die den Einsatz koordinierter Verfahren behindern. Primär zu nennen ist die Gefahr, dass Unternehmen ihre Planungshoheit verlieren und aus diesem Grund nicht bereit sind, sich an koordinierenden Verfahren zu beteiligen. Planungshoheit bedeutet, dass ein Unternehmen selbstständig über seine Ressourcen und ihre Verwendung entscheiden kann. Dieser Umstand ist dann nicht mehr gegeben, wenn durch den Abnehmer ein zentrales Planungssystem eingeführt wird, das die Ressourcen des Lieferanten beplant. Der Lieferant ginge so eine starke Abhängigkeit zu einem seiner Abnehmer ein und würde andere Kunden nachrangig behandeln. Zudem ist ihm die Möglichkeit zur effizienten und aus seiner Sicht optimalen Planung genommen. Solange das koordinierende Verfahren also nicht dezentral organisiert ist, werden sich Lieferanten dagegen aussprechen, da es ihnen nur schaden kann.

Eng damit verbunden ist das Problem des Datenschutzes. Lieferanten möchten eine Vielzahl von Informationen unter Verschluss halten, da deren Kenntnis einen Kunden in eine

bessere Verhandlungsposition bringen könnte. Dazu gehören u.a. die Kapazitätsauslastung oder die Produktionskosten und folglich die Gewinnspanne des Lieferanten.

Die vorher genannten Probleme lassen sich lösen, indem statt wie bei innerbetrieblicher Planung üblich kein zentrales Planungssystem verwendet wird, sondern ein dezentrales Verfahren Anwendung findet. Dieses hat jedoch zusätzlich das Problem des so genannten „Benefit Sharings“, d.h. der „gerechten Last- und Gewinnverteilung“ [Wes07, S. 181], zu lösen. In dem Beispiel in Abbildung 2.2 kann eine Verbesserung der Transportvorgänge ohne Verschlechterung der Produktionseffizienz erreicht werden. Dies wird in der Regel nicht der Fall sein, d.h. eine Verbesserung in einem Bereich kann nur durch eine Verschlechterung in einem anderen erreicht werden. Dann stellt sich die Frage, ob der Nutzen größer ist als der Schaden. Bei zentraler Planung kann die Änderung bei überwiegendem Nutzen in jedem Fall vorgenommen werden. Bei dezentraler Planung muss der profitierende Partner dem einbüßenden Partner einen Anreiz zur Zustimmung liefern, also mindestens seinen Schaden ersetzen. Solange dies nicht fair und transparent gelöst ist, werden sich Lieferanten und Spediteure nicht an einem koordinierten Planungssystem beteiligen.

2.3. Ziele der Arbeit

Die Arbeit verfolgt zwei Ziele. Zunächst soll das Potenzial untersucht werden, das sich theoretisch aus einer abgestimmten Produktions- und Belieferungsplanung der Lieferanten bzw. einer Teilmenge der Lieferanten eines gemeinsamen Abnehmers ergeben könnte. Dazu soll ein mathematisches Modell entwickelt werden, das die beschriebene Supply Chain abbildet. Da auf Grund der Komplexität des Problems nicht davon auszugehen ist, dass für gegebene Szenarien eine optimale Lösung gefunden werden kann, soll auch ein heuristisches Verfahren implementiert werden. Der Vorteil dabei ist, dass sich mit sehr viel kürzeren Laufzeiten Ergebnisse nahe am Optimum erzielen lassen. Die zweite Zielsetzung betrifft die praktische Umsetzung. Da der Einsatz eines zentralen Planungsverfahrens für rechtlich wie wirtschaftlich voneinander unabhängige Unternehmen nicht realistisch ist, soll eine Methode zur dezentralen Planung ohne Offenlegung unternehmensinterner Daten entworfen werden. Auch auf diese Weise wird nicht die optimale Lösung gefunden werden, allerdings berücksichtigt dieses Verfahren wichtige Kriterien aus der Praxis.

2.3.1. Identifikation ökonomischer und ökologischer Potenziale

Die Suche nach ökonomischen Potenzialen erklärt sich durch zunehmenden Kostendruck und steigende Wettbewerbsintensität. Die Suche nach Verbesserungsmöglichkeiten beginnt üblicherweise innerhalb des eigenen Unternehmens, da hier die völlige Übersicht über Daten und die nahezu uneingeschränkte Möglichkeit zur Veränderung von Abläufen vorliegt. In der Vergangenheit hat dies im Zusammenspiel mit immer leistungsfähigeren Rechnern zu stetig umfassenderen Modellen geführt. Vom reinen Material Requirement Planning (MRP) ging die Entwicklung über das Manufacturing Resources Planning (MRP II) zu Advanced Planning and Scheduling-Systemen (APS). In den letzten Jahren hat sich außerdem die Erkenntnis durchgesetzt, dass weiteres Potenzial in der unternehmensübergreifenden Zusammenarbeit liegt, da einzelne Unternehmen bzw. Werke für sich genommen bereits eine sehr hohe Effizienz aufweisen, und Maßnahmen dieses zu verwirklichen wurden unter dem Namen „Supply Chain Management“ (SCM) zusammengefasst. Auch der Transport als Bindeglied der Supply Chain ist in diese Betrachtung eingeschlossen. Die gegenseitigen Auswirkungen der Produktions- und Transportplanung sind bislang kaum beachtet worden, sodass durch eine Abstimmung bisher nicht erkannte Potenziale genutzt werden können.

Ökologische Ziele wurden bis vor wenigen Jahren von Unternehmen nicht in letzter Konsequenz verfolgt, mittlerweile hat sich jedoch nahezu jedes Unternehmen zur Nachhaltigkeit verpflichtet, was immer auch im Einzelnen darunter verstanden wird. Dieser Sinneswandel ist vor allem durch den gestiegenen öffentlichen Druck und die Befürchtung von Imageschäden, das allgemein akzeptierten Phänomen des Klimawandels und die zunehmende Kopplung von Abgaben an Emissionen erfolgt¹³. Für produzierende Unternehmen bedeutet dies vor allem, Produkte aus umweltverträglichen Materialien herzustellen und die Fertigung möglichst energieeffizient bzw. unter Nutzung regenerativer Energiequellen durchzuführen. Durch die operative Produktionsplanung selbst lassen sich ökologische Kennzahlen nicht oder nur geringfügig beeinflussen. Als Ziele einer ökologisch orientierten Transportplanung werden in der Literatur folgende genannt (vgl. [Sou00]):

- Senkung der mittleren Transportweite
- Steigerung der Transporteffizienz

¹³Beispielsweise der Emissionshandel für Luftfahrtunternehmen, der u.U. auf weitere Branchen ausgedehnt werden wird.

- Verlagerung des Transports auf umweltfreundlichere Transportmittel

Der erste sowie letzte Punkt sind eher für eine taktisch-operative Betrachtung geeignet, da sie strukturelle Änderungen erfordern. In dieser Arbeit wird eine Untersuchung der operativen Planung vorgenommen und somit zuvorderst eine Verbesserung der Transporteffizienz angestrebt. Bei Eisenkopf heißt es: „Falls es in der Zukunft gelingen wird, die integrative Transportplanung über die gesamte Lieferkette zu einer Kernfunktion des Supply Chain Planning aufzuwerten, bestehen aber durchaus Chancen, dass SCM zu einer Steigerung der Nachhaltigkeit von Transportprozessen beiträgt.“ [Eis08, S. 1045].

2.3.2. Modellierung des Produktions- und Transportsystems

In diesem Schritt erfolgt die Formalisierung des zuvor beschriebenen Koordinationsproblems. Dazu werden zunächst alle bei der Planung zu beachtenden Parameter, Variablen und Restriktionen zusammengestellt. Aus der Wahl der Parameter und Variablen folgt die Systemgrenze, denn Parameter, die nicht in die Planung eingehen, und Variablen, die nicht durch die Planung festgelegt werden, können nicht Teil des zu koordinierenden Systems sein. Dabei kann auch auf bestehende Formulierungen aus der Literatur Bezug genommen und eine Abgrenzung vorgenommen werden. Der Nutzen besteht darin, dass das Problem und seine Einflussgrößen exakt definiert sind. Grundsätzlich kann durch die Verwendung einer mathematischen Modellierungssprache auch ein lineares Optimierungsmodell erzeugt werden, welches durch Standardlösungsverfahren berechnet werden kann. Zusätzlich wird die Analyse des Stands der Technik zeigen, dass die Verknüpfung von Produktions- und Transportmodellen auf der Ebene des Scheduling ein auch in der Theorie noch nicht erschöpfend behandeltes Themenfeld darstellt.

2.3.3. Abschätzung des theoretischen Optimums

Das zuvor entworfene formale Modell kann grundsätzlich zur Lösung von Probleminstanzen genutzt werden. Allerdings werden schon kleine Szenarien kaum mehr lösbar sein, da sie sich aus sehr komplexen Teilproblemen zusammensetzen, die im Falle der Produktionsplanung auch noch für jeden Lieferanten separat enthalten sind. Für solche Probleme wird üblicherweise eine Heuristik entworfen, d.h. ein Verfahren, das in relativ kurzer Zeit eine Lösung nahe am Optimum bestimmen kann. Von Reeves wird eine Heuristik definiert als

„a technique which seeks good (i.e. near-optimal) solutions at a reasonable computational cost without being able to guarantee either feasibility or optimality, or even in many cases to state how close to optimality a particular feasible solution is“ [Ree95, S. 6].

Heuristische Verfahren sind eine heterogene Gruppe von Algorithmen, die in problemspezifische und auf Metaheuristiken basierende Verfahren unterschieden werden kann. Eine problemspezifische Heuristik ist beispielsweise das Silver-Meal-Verfahren (vgl. [Tem06, S. 163]) zur Lösung dynamischer Losgrößenmodelle. Metaheuristiken dagegen sind Verfahren, die an eine Vielzahl von Problemstellungen angepasst werden können, so zum Beispiel die Ant Colony Optimization (vgl. [DMC96]), über deren Graphstruktur verschiedene Probleme, besonders solche zum Scheduling, abgebildet und gelöst werden können.

Auswahl und Implementation eines heuristischen Verfahrens gehören zu den Zielen dieser Arbeit, um die identifizierten Potenziale quantifizieren zu können. Das Verfahren soll das formale Modell nachbilden und lösen. Suboptimale Lösungen werden in Kauf genommen, solange sie besser sind als die sukzessiv gefundenen, die zum Vergleich ebenfalls errechnet werden müssen.

2.3.4. Implementierung eines praxisorientierten Planungssystems

Die zuvor geforderte Heuristik repräsentiert ein zentrales Planungsverfahren, das in Konflikt mit den in 2.2.4 dargestellten Anforderungen an eine praxisgerechte Lösung steht, denn kein Unternehmen wird die erforderlichen Daten einer zentralen Planungsinstanz zur Verfügung stellen und die resultierende Lösung, die zur eigenen Planung durchaus nachteilig sein kann, widerspruchslos übernehmen. Es existieren verschiedene Verfahren, um die Zusammenarbeit zwischen Unternehmen ohne diese Hindernisse zu ermöglichen. Speziell die Eigenschaften von Multiagentensystemen zeigen eine hohe Übereinstimmung mit den Anforderungen im Supply Chain Management, weswegen die dezentrale Lösungsfindung auf einem solchen beruhen soll. Bestandteile eines praxisorientierten Verfahrens sind ein Koordinationsprozess, lokale Planungsverfahren und ein Verfahren zur Bestimmung von Anreizen, um Partner zu gewünschten Änderungen zu veranlassen.

2.4. Anforderungen an die Problemlösung

Nachdem das Problem geschildert und die Ziele der Beteiligten betrachtet wurden, ergaben sich die grundsätzlichen Ziele dieser Arbeit. Bevor die Lösung entworfen werden kann, fehlt noch ein Blick auf die Anforderungen an diese. Es bestehen zum einen Anforderungen aus theoretischer Sicht, zum anderen Anforderungen, die formuliert wurden, um einen späteren Einsatz in der Praxis zu ermöglichen.

2.4.1. Anforderungen an die theoretische Problemlösung

Die hier dargelegten Anforderungen beziehen sich auf die Eingabewerte und die Lösungsmethode, die verwendet werden, um zu einer Lösung für das Problem als Ganzes zu gelangen.

- Lösbarkeit in akzeptabler Zeit

Die Planung muss in kurzer Zeit durchführbar sein, besonders für den dezentralen Einsatz, bei dem mehrere Vorschläge erzeugt und eingehende Anfragen bewertet werden müssen.

- Realistische Szenarien

Da die Szenarien nicht der Praxis entnommen werden können, müssen Daten erzeugt werden. Um zu übertragbaren Aussagen zu kommen, müssen sie ein Szenario abbilden, das in ähnlicher Form existieren könnte.

- Modulare und anpassbare Software

Da Supply Chains strukturell und organisatorisch auf vielfältige Weise gebildet werden können, sollte es einfach möglich sein, die entwickelte Software so anzupassen, dass auch anders aufgebaute Szenarien beplant werden können. Gleichzeitig ist zu beachten, dass die Software kein existierendes Planungssystem ablösen kann, sondern vielmehr als Ergänzung und Schnittstelle zu den anderen Planungsdomänen eingesetzt werden wird.

Ausdrücklich nicht Ziel der Arbeit ist es, den Abstand der gefundenen Lösung zur optimalen Lösung zu minimieren oder zu bestimmen; vielmehr soll der Abstand der gefundenen Lösung zur sukzessiven und unkooperativen Ausgangslösung maximiert werden.

2.4.2. Anforderungen zur praktischen Umsetzbarkeit

Selbst wenn durch das integrierte zentrale Planungssystem nachgewiesen werden kann, dass Effizienzsteigerungen möglich sind, so müssen diese auch in der Praxis realisierbar sein. Dazu sind die Anforderungen aus der Praxis zu berücksichtigen, welche die Planung betreffend vor allem drei sind:

- **Wahrung der Planungsautonomie**

Die Planungsautonomie, also die Möglichkeit eines Unternehmens interne Entscheidungen ohne Einfluss Dritter fällen zu können, ist von höchster Wichtigkeit. Ein Unternehmen, das seine Planungsautonomie aufgibt, wird zum reinen Befehlsempfänger und kann nur noch in beschränktem Umfang über seine Ressourcen verfügen und sie zum größtmöglichen Eigennutzen einsetzen (vgl. [DPR04, S. 17]).

- **Wahrung des Datenschutzes**

Jedes Unternehmen besitzt gewisse interne Daten, deren Vertraulichkeit wichtig ist, da ihre Kenntnis anderen Unternehmen einen Vorteil verschaffen könnte. Dieser Umstand ist bspw. bei Konstruktionsplänen gegeben, aber auch bei planerischen Daten. Wissen über die aktuelle Kapazitätsauslastung, die Herstellungskosten oder die Produktivität kann verwendet werden, um das betreffende Unternehmen bei Verhandlungen unter Druck zu setzen.

- **Gewinnmaximierung**

Es ist kaum anzunehmen, dass einer der Beteiligten seine Planung zum Nutzen eines anderen ändert, wenn er nicht selbst davon profitiert. Das Verfahren kann also nur dann erfolgreich sein, wenn entweder eine Umplanung für den betreffenden Partner kostenneutral ist und er darauf vertrauen kann, dass die übrigen Beteiligten in einer ähnlichen Situation ebenfalls entgegenkommend reagieren, oder aber der Benachteiligte durch eine Ausgleichszahlung entschädigt wird.

3. Stand der Technik

An dieser Stelle sollen zunächst die existierenden Ansätze für die beiden Teilprobleme Losgrößen- und Tourenplanung vorgestellt werden, sowie Modelle, die simultan mehrere Stufen beplanen. Daran schließt sich eine Darstellung der Belieferungsformen in der Automobilindustrie an. Anschließend werden konventionelle Informationssysteme zur Materialversorgungsplanung und deren Unterstützungsansätze für Kooperation diskutiert. Zuletzt werden die Grundlagen von Multiagentensystemen vorgestellt und existierende Ansätze zum Einsatz in der Supply Chain präsentiert.

3.1. Modellbasierte Verfahren zur Losgrößen- und Routenplanung

In diesem Abschnitt sollen Modelle aus dem Bereich des Operations Research vorgestellt werden, die sich mit dem Problem der Bestimmung einer optimalen Produktions- oder Bestelllosgröße, also der Menge unterbrechungsfrei gefertigter bzw. bestellter gleichartiger Produkte, sowie der Touren- und Routenplanung, d.h. der Zusammenstellung von Knoten zu einer von einem Fahrzeug zu fahrenden Tour und der Bestimmung der Anfahrtsreihenfolge zur Streckenminimierung, beschäftigen.

3.1.1. Losgrößenprobleme

Losgrößenmodelle werden dazu verwendet, die optimalen Zeitpunkte und Mengen für die Produktion zu bestimmen (vgl. [JD08, S. 1619]). Unter einem Los wird die jeweilige Fertigungsmenge, d.h. die Anzahl auf einer Ressource unterbrechungsfrei gefertigter gleichartiger Teile (vgl. [DW97, S. 84f.]). Die Bestimmung dieser Anzahl ist für den effizienten Produktionsbetrieb von fundamentaler Bedeutung und hat deswegen seit Jahrzehnten

weite Beachtung gefunden. Die Betätigung auf diesem Feld ist längst nicht abgeschlossen, da immer weitere Restriktionen abgebildet und die Modelle damit an die verschiedensten Anforderungen der Praxis angepasst werden. Zurückverfolgen lassen sich diese Anstrengungen bis zum Artikel „How Many Parts to Make at Once“ von Ford W. Harris aus dem Jahr 1913 [Har13]. Aus dieser Arbeit folgt das klassische Losgrößenmodell, die Andlersche Losgrößenformel, die im angelsächsischen Raum als „Economic Order Quantity“ (EOQ) bekannt ist¹. Dieses ermittelt die optimale Bestellmenge Q_{opt} basierend auf der Angabe von Gesamtbedarf, Bestellfixkosten und Lagerhaltungskosten (vgl. [DW97, S. 346ff.]). Dabei steht JB für den Jahresbedarf, K_B für die Kosten pro Bestellung, p für den Stückpreis und l für den Lagerhaltungskostenfaktor in Prozent.

$$Q_{opt} = \sqrt{\frac{200 \cdot JB \cdot K_B}{p \cdot l}} \quad (3.1)$$

Zweck dieser Formel ist es, die Bestellmenge zu finden, die die summierten Bestell- und Lagerhaltungskosten minimiert, wobei die Bestellkosten mit größeren Losen sinken, die Lagerhaltungskosten jedoch steigen (vgl. Abbildung 3.1). Die Annahmen dieses Modells sind stark simplifiziert und in dieser Form in der Praxis nicht anzutreffen. Produktionslosgrößenmodelle sind ähnlich, zeigen jedoch teilweise andere Eigenschaften (bspw. sequenzabhängige Rüstkosten). Entsprechend der Aufgabenstellung werden im Weiteren Produktions- und keine Bestelllose betrachtet.

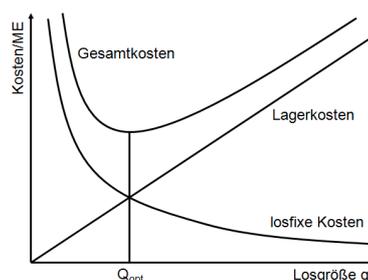


Abbildung 3.1.: Bestimmung der optimalen Losgröße

Zunächst sollen einige Eigenschaften der folgenden Modelle genauer spezifiziert werden. Lagerhaltungskosten stellen einen Oberbegriff für eine Vielzahl von Kosten dar, die im Zusammenhang mit der Lagerung von Waren auftreten. Beispiele sind die auftretende Kapitalbindung, der Flächenverbrauch, die Verschrottungskosten für nicht mehr benötigte

¹Tatsächlich liegt keine exakte Übereinstimmung vor, vgl. [Kri05]

bzw. veraltete Teile, das Personal und die Versicherung. Lagerhaltungskosten verlaufen meist linear. Rüstkosten ergeben sich aus „der Multiplikation der Wechselzeiten mit dem Kostensatz der Produktionsstelle plus den Kosten des Anlaufmaterialverlustes“ [Gud05, S. 546]. Die Notwendigkeit zum Rüsten entsteht meist durch einen Werkzeugwechsel, der die Produktion eines anderen Teils ermöglicht.

Klassifizierungsmerkmale sind von verschiedenen Autoren herausgearbeitet worden (vgl. u.a. [DSV97, S. 69ff.], [DK97], [Tem06, S. 131ff.], [JD08]). Auf Grund des Umfangs des Gegenstands findet sich jedoch kein allumfassendes Klassifizierungsschema und die meisten Veröffentlichungen widmen sich einem Teilaspekt. Einige fundamentale Charakteristika finden sich dennoch überall wieder. Die vorliegende Darstellung orientiert sich weitgehend an der von Suerie [Sue05, S. 7ff.].

3.1.1.1. Klassifizierungsmerkmal Zielfunktion

Um eine optimale Losgrößenplanung durchführen zu können, muss das gewünschte Zielkriterium bekannt sein. Folgende Ziele treten in Modellen auf, wobei die Kostenminimierung von zentraler Bedeutung ist und weitere Teilziele monetär quantifiziert einfließen oder durch Nebenbedingungen abgebildet werden:

- **Kostenminimierung**

Üblicherweise wird durch die Losgrößenplanung versucht, gegebene Bedarfe termingerecht und zu minimalen Kosten zu befriedigen. Die dafür relevanten Kosten beziehen sich in den meisten Fällen auf:

- Lagerhaltungskosten: diese Kosten können bei mehrstufigen Modellen unterschiedlich hoch sein, vor allem auf Grund des Produktwertes.
- Rüstkosten: hierbei ist zu unterscheiden, ob die Rüstkosten abhängig von der Reihenfolge, in der gerüstet wird, anfallen oder nicht. Ersteres ist nur für Modelle möglich, die eine solche Reihenfolge bestimmen. Für gewöhnlich werden Rüstkosten als symmetrisch angenommen. Rüstkosten sind unabhängig von der Losgröße.
- Produktionskosten: werden häufig vernachlässigt, falls sie keinen Zeitbezug haben, können aber bspw. für Überstunden, Nacht- oder Wochenendschichten benötigt werden.

- Verspätungskosten: sind Verspätungen durch das Modell erlaubt, so können Strafkosten dafür definiert werden.

- Minimierung der Durchlaufzeit
- Maximierung des Outputs
- Gleichmäßige Kapazitätsauslastung

3.1.1.2. Klassifizierungsmerkmal Zeit

Die Merkmale dieser Kategorie beziehen sich auf die Modellierung der Zeit und der Zeitabhängigkeit der enthaltenen Daten.

- Zeitmodell: die Zeit kann in diskreten, beliebig großen Abschnitten, so genannten Buckets, oder kontinuierlich modelliert werden. Für gewöhnlich werden Big Bucket- und Small Bucket-Modelle unterschieden. Bei einem Small Bucket-Modell ist der Zeitabschnitt so klein gewählt, dass er lediglich ein Ereignis enthält, bei Big Bucket-Modellen sind in der Regel mehrere enthalten. In letzterem Fall wird allerdings die Reihenfolge der enthaltenen Ereignisse nicht definiert, während diese im ersten Fall durch die Abfolge von Einzelereignissen bereits eindeutig bestimmt ist.
- Planungshorizont: der betrachtete Horizont ist entweder endlich oder unendlich.
- Zeitabhängigkeit der Parameter (Bedarfe, Kapazitäten und weitere): entweder treten diese statisch oder dynamisch auf, was entscheidenden Einfluss auf die Modellierung des Problems hat. Statische Modelle werden auch als stationär bezeichnet.
- Datenverfügbarkeit: Daten sind eventuell mit Unsicherheit behaftet, sodass stochastische Modelle Verteilungen, z.B. für den Bedarf, statt exakter Werte benutzen.

3.1.1.3. Klassifizierungsmerkmal Ressourcen

Die für die Produktion benötigten Ressourcen können nach folgenden für die Planung relevanten Kriterien klassifiziert werden:

- Kapazitäten: Ressourcen können unbegrenzt oder begrenzt nutzbar sein. Die Kapazität einer Ressource ist meist pro Periode festgelegt und von anderen Perioden unabhängig, aber auch eine Abhängigkeit ist möglich, z.B. bei Zusatzschichten, die nicht in aufeinanderfolgenden Perioden eingesetzt werden können.
- Anzahl: in der Praxis ist meist mehr als eine Fertigungsressource an der Erstellung eines Produktes beteiligt. Der Frage nach der optimalen Maschinenbelegung geht die Frage nach der Zuordnung von Aufträgen zu Maschinen voraus. Durchläuft jeder Auftrag jede Maschine in beliebiger Reihenfolge, so spricht man von Open-Shop-Fertigung. Ist hingegen die Reihenfolge für alle Aufträge determiniert, so liegt eine Flow-Shop- oder Fließfertigung vor. Zuletzt können Aufträge Fertigungsmittel in gegebener, aber individueller Reihenfolge durchlaufen und müssen dabei auch nicht alle Fertigungsmittel belegen. In dem Fall handelt es sich um Job-Shop- oder Werkstattfertigung.
- Auslastung: es kann eine Mindest- oder Maximalauslastung einer Ressource vorgegeben werden, außerdem eine geforderte Ruhezeit zwischen zwei Losen, etwa für Reinigungsvorgänge in der Prozessindustrie.
- Produktionsgeschwindigkeit: die Geschwindigkeit kann als unendlich angenommen werden, dies geschieht zumeist bei statischen Modellen.
- Rüstvorgänge: es werden sequenzabhängige und sequenzunabhängige Rüstkosten bzw. -zeiten unterschieden.

3.1.1.4. Klassifizierungsmerkmal Produkte

- Anzahl: es wird zwischen dem Ein- und Mehrproduktfall unterschieden. Bei nur einem Produkt findet keine Konkurrenz um die Ressourcen statt.
- Produktstruktur: sind die gefertigten Produkte unabhängig voneinander, liegt ein einstufiges Modell vor. Anderenfalls kann die Stückliste des oder der Endprodukte konvergierend, divergierend, seriell oder eine Mischform sein. Durch die Zwischenprodukte entsteht ein mehrstufiges Modell, deren Losgrößen simultan ermittelt werden müssen, da bestimmte Teile Vorprodukte für andere Teile sind und daher für deren Produktion verfügbar sein müssen.

- Weitergabe: die Weitergabe von produzierten Teilen erfolgt entweder komplett nach der Fertigung des gesamten Loses (geschlossene Produktion) oder einzeln (offene Produktion). Die Unterscheidung ist nur für endliche Produktionsgeschwindigkeiten relevant.
- Lagerbestand: der Lagerbestand kann zwischen einer Ober- und Untergrenze gefordert werden, um Sicherheitsbestand und Lagerkapazitäten abzubilden. Zusätzlich kann Lagerbestand verderblich oder überholt und damit wertlos werden.
- Verspätungen: das Modell kann es erlauben, Bedarfe verspätet in nachfolgenden Perioden befriedigen (backlogging) oder nicht erfüllte Bedarfe als verloren anzusehen.

Es ist an dieser Stelle wichtig zu betonen, dass im Allgemeinen für mehrstufige Losgrößenmodelle angenommen wird, dass sich die Fertigungsressourcen am selben Standort befinden und somit nur ein innerbetrieblicher Transport notwendig ist, der für die gewünschte Planungsgenauigkeit vernachlässigbar ist. Dabei wird vom Transportvorgang abstrahiert, d.h., es wird angenommen, dass eine Menge, die das Ausgangslager des Zulieferers verlässt, unmittelbar in die Produktion des Abnehmers einmündet.

3.1.1.5. Standardprobleme

Die Betrachtung wird das Merkmal Zeit betreffend eingeschränkt auf diskrete, endliche, dynamische und deterministische Modelle. Das grundlegendste Modell dieser Klasse ist das Capacitated Lot Sizing Problem (CLSP, vgl. [Tem06, S. 161ff.]). Zusätzlich zu den genannten Annahmen geht es von einstufiger Mehrproduktfertigung, endlicher Produktionsgeschwindigkeit, begrenzter Kapazität und nicht erlaubten Fehlmengen aus. Kostenrelevant sind Rüst- und Lagerhaltungskosten. Rüstkosten sind, da es sich um ein Big Bucket-Modell handelt, nicht sequenzabhängig. Das Ergebnis der Berechnung des CLSP ist der optimale Plan für die zu produzierenden Mengen jedes Produktes in jeder Periode, jedoch ohne Angabe der Produktionssequenz innerhalb der Perioden. Eine Periode hat üblicherweise eine Länge von etwa einer Woche. Das Ergebnis der CLSP-Optimierung kann genutzt werden, um eine periodenweise Sequenzierung durchzuführen. Die Darstellung des CLSP ist in der Literatur nicht eindeutig, so verzichten beispielsweise Domschke et al. [DSV97, S. 134ff.] auf die Berücksichtigung der Produktionskosten in der Zielfunktion, da sie sie als unveränderlich und damit entscheidungsirrelevant ansehen, berücksichtigen keine Rüstzeiten und verwenden nur eine Produktionsressource. Tempelmeier hingegen

setzt die Produktionskosten in Zeitbezug, zieht die Rüstzeiten von der verfügbaren Ressourcenkapazität ab und benutzt mehrere Produktionsressourcen. Nachfolgend findet sich die eine Formalisierung des CLSP mit einer Ressource, zeitinvarianten Parametern und Rüstzeiten; in Tabelle 3.1 werden die verwendeten Symbole aufgeführt.

$$\min. \rightarrow \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T (RK_p \cdot rs_{p,t} + LK_p \cdot i_{p,t}) \quad (3.2)$$

$$i_{p,t-1} + q_{p,t} - i_{p,t} = D_{p,t} \quad \forall p \in 1..P, t \in 1..T \quad (3.3)$$

$$q_{p,t} - M \cdot rs_{p,t} \leq 0 \quad \forall p \in 1..P, t \in 1..T \quad (3.4)$$

$$\sum_{p=1}^P (PZ_p \cdot q_{p,t} + RZ_p \cdot rs_{p,t}) \leq K \quad \forall p \in 1..P, t \in 1..T \quad (3.5)$$

$$q_{p,t} \geq 0 \quad \forall p \in 1..P, t \in 1..T \quad (3.6)$$

$$i_{p,0} = i_{p,T} = 0 \quad \forall p \in 1..P \quad (3.7)$$

$$i_{p,t} \geq 0 \quad \forall p \in 1..P, t \in 1..T \quad (3.8)$$

$$rs_{p,t} \in \{0, 1\} \quad \forall p \in 1..P, t \in 1..T \quad (3.9)$$

Die Zielfunktion 3.2 setzt sich aus Rüst- und Lagerhaltungskosten zusammen. Restriktion 3.3 stellt die Lagerbestandgleichung dar, d.h. der Bestand wird unter der Berücksichtigung von Entnahmen und eingehenden Losen fortgeschrieben. Restriktion 3.4 zwingt den Rüstindikator rs auf 1, falls das entsprechende Produkt in der Periode gefertigt wird. Restriktion 3.5 stellt die Einhaltung der Kapazität sicher und beachtet dafür Produktions- und Rüstzeiten. Restriktion 3.6 erlaubt keine Losgrößen kleiner Null. Restriktion 3.7 setzt

den Anfangslagerbestand für jedes Produkt auf Null und fordert, dass es zu Ende des Planungshorizonts keine Bestände geben darf. Restriktion 3.8 stellt sicher, dass kein negativer Bestand auftritt. Restriktion 3.9 deklariert den Rüstindikator als binär.

Symbol	Bedeutung
$D_{p,t}$	Bedarf für Produkt p in Periode t
K	verfügbare Kapazität
LK_p	Lagerhaltungskosten für Produkt p
M	große Zahl
P	Anzahl der Produkte
PZ_p	Produktionszeit für Produkt p
RK_p	Rüstkosten für Produkt p
RZ_p	Rüstzeit für Produkt p
T	Länge des Planungshorizonts
$i_{p,t}$	Lagerbestand für Produkt p in Periode t
$q_{p,t}$	Losgröße für Produkt p in Periode t
$rs_{p,t}$	Rüstzustandsindikator für Produkt p in Periode t

Tabelle 3.1.: Symbole des CLSP

Bei der Erweiterung des CLSP um mehrstufige Fertigung wird vom Multi-Level Capacitated Lot Sizing Model (MLCLSP) gesprochen. Es unterscheidet sich in zwei Aspekten vom vorgestellten CLSP. Die Lagerbestandsgleichung ist geändert, um der vorliegenden Produktstruktur Rechnung zu tragen, außerdem wird die Beschränkung auf eine Ressource aufgehoben. Die neue Lagerbestandsgleichung lautet:

$$i_{p1,t-1} + q_{p1,t-v_p} - \sum_{p2 \in \mathbb{N}_p} (a_{p1,p2} \cdot q_{p2,t}) - i_{p,t} = D_{p,t} \quad (3.10)$$

Wiederum werden Entnahmen und Zugänge verrechnet, nun muss allerdings beachtet werden, dass gefertigte Teile in andere zu fertigende Teile eingehen. Diese Beziehung wird über die Menge \mathbb{N}_p dargestellt, die für jedes Produkt p angibt, in welche Nachfolgeprodukte es eingeht. Gemeinsam mit Parameter a , der den Bedarfskoeffizienten angibt, lassen sich die für die Produktion der Nachfolgeprodukte benötigten Entnahmen berechnen und

vom Bestand entfernen. Gefertigte Lose gehen mit der Verzögerung v_p in den Bestand ein, damit keine unzulässigen Lösungen entstehen, falls ein Produkt die gleiche Ressource für mehrere nicht aufeinanderfolgende Vorgänge belegt (vgl. [Tem06, S. 207]). Die geänderte Kapazitätsrestriktion, die die Beanspruchung jeder Ressource r durch die auf ihr gefertigten Produkte κ_r berücksichtigt, lautet:

$$\sum_{p \in \kappa_r} (PZ_p \cdot q_{p,t} + RZ_p \cdot r_{s_{p,t}}) \leq K \quad \forall r \in 1..R, t \in 1..T \quad (3.11)$$

Wird die Zeit pro Periode sehr klein gewählt, etwa im Bereich einer Schicht oder Stunde, so wird von einem Small Bucket-Modell gesprochen, das zusätzlich eine Produktionsreihenfolge bestimmt. In der einfachsten Form liegt das Discrete Lot Sizing and Scheduling Problem (DLSP, vgl. [Fle90]) vor. Hierbei kann pro Periode lediglich eine oder gar keine Produktart hergestellt werden. Wenn die Produktion erfolgt, so wird die gesamte Kapazität der Periode genutzt. Ein Rüstvorgang kann maximal einmal zu Beginn einer Periode durchgeführt werden und beansprucht keine Kapazität. Erstreckt sich die Produktion eines Loses über mehrere Perioden, so wird berücksichtigt, dass der Rüstvorgang ausschließlich zu Beginn der ersten Periode erfolgen muss. Es ergibt sich folgende Darstellung:

$$\min. \rightarrow \sum_{p=1}^P \sum_{t=1}^T (RK_p \cdot r_{f_{p,t}} + LK_p \cdot i_{p,t}) \quad (3.12)$$

$$i_{p,t-1} + Q_p \cdot r_{s_{p,t}} - i_{p,t} = D_{p,t} \quad \forall p \in 1..P, t \in 1..T \quad (3.13)$$

$$r_{f_{p,t}} \geq r_{s_{p,t}} - r_{s_{p,t-1}} \quad \forall p \in 1..P, t \in 1..T \quad (3.14)$$

$$\sum_{p=1}^P r_{s_{p,t}} \leq 1 \quad \forall t \in 1..T \quad (3.15)$$

$$r_{f_{p,t}}, r_{s_{p,t}} \in \{0, 1\} \quad \forall p \in 1..P, t \in 1..T \quad (3.16)$$

$$i_{p,t} \geq 0 \quad \forall p \in 1..P, t \in 1..T \quad (3.17)$$

$$i_{p,0} = 0 \quad \forall p \in 1..P \quad (3.18)$$

$$rs_{p,0} = 0 \quad \forall p \in 1..P \quad (3.19)$$

Als Änderungen zum CLSP sind zu beachten, dass die Losgrößen als Parameter vorgegeben sind und dann zwischen Rüstvorgang rf und Rüstzustand rs unterschieden wird (vgl. 3.2). Die Forderung nach null Bestand zum Ende des Planungshorizonts kann wegen der nur grob steuerbaren produzierten Menge nicht aufrechterhalten werden.

Symbol	Bedeutung
Q_p	Losgröße einer Periode für Produkt p
$rf_{p,t}$	Rüstvorgangsindikator für Produkt p in Periode t

Tabelle 3.2.: Zusätzliche Symbole des DLSP

Das DLSP kann insbesondere um sequenzabhängige Rüstzeiten ergänzt werden. Dazu bekommt der Rüstvorgangsindikator einen weiteren Index, um anzeigen zu können, zwischen welchen Produkten gerüstet wird: $rf_{p1,p2,t}$. Die dazugehörige Restriktion lautet:

$$rf_{p1,p2,t} \geq rs_{p1,t-1} + rs_{p2,t} - 1 \quad \forall p1, p2 \in P, t \in T \quad (3.20)$$

Das Continuous Setup Lot Sizing Problem (CSLP, vgl. [DSV97, S. 150]) ist dem DLSP sehr ähnlich, unterscheidet sich aber in zwei Eigenschaften. Zum einen entfällt die „alles oder nichts“-Annahme, d.h. für die Produktion muss nicht die gesamte Kapazität einer Periode genutzt werden, was in der Praxis zu unnötiger Lagerhaltung führt. Zum anderen wird der Rüstzustand auch über Perioden ohne Produktion fortgeschrieben, sodass durch die Unterbrechung nicht erneut auf das gleiche Produkt gerüstet wird.

Um zu vermeiden, dass ungenutzte Kapazität in den Perioden verfällt, wurde das Proportional Lot Sizing and Scheduling Problem (PLSP, vgl. [DH95]) formuliert, das einen einmaligen Rüstvorgang innerhalb der Periode erlaubt, sodass in jeder Periode bis zu zwei verschiedene Produkte gefertigt werden können. Dazu wird das erste Produkt einer Pe-

riode mit dem zweiten Produkt der vorhergehenden Periode gekoppelt. Die Produktion wird folgendermaßen mittels des Rüstzustandes eingeschränkt:

$$M \cdot r_{s_p,t} + M \cdot r_{s_p,t-1} - q_{p,t} \geq 0 \quad \forall p \in P, t \in T \quad (3.21)$$

Die bislang vorgestellten Verfahren teilen sich in Big Bucket- und Small Bucket-Modelle auf. Diese beiden Ansätze werden beim General Lot Sizing and Scheduling Problem (GLSP, vgl. [FM97]) kombiniert, sodass für Makro- und Mikroperioden simultan geplant wird. Dazu werden die Mengen S_t gebildet, die eine gleichbleibende Anzahl nicht-überlappender Mikroperioden enthalten, die zur Makroperiode t gehören. Bedarfe und Lagerhaltung werden als externe Dynamik über die Makroperioden abgebildet, die Sequenzbildung als interne und unabhängige Dynamik über die Mikroperioden. Innerhalb der Mikroperioden gilt wie beim DLSP, dass die verfügbare Kapazität entweder vollständig für ein einziges Los oder gar nicht genutzt wird, wobei sich die Kapazitätsrestriktion auf jeweils eine Makroperiode bezieht. Die Anzahl der verschiedenen Lose pro Makroperiode ist daher durch die Anzahl der Mikroperioden begrenzt. Allerdings ist die Länge der Mikroperioden nicht vorgegeben und wird bei der Lösung bestimmt, da sie sich direkt aus der produzierten Menge ableitet. Das Modell in der Variante mit Erhaltung des Rüstzustandes präsentiert sich unter Annahme zeitinvarianter Kapazitäten wie folgt:

$$\min. \rightarrow \sum_p^P \sum_t^T LK \cdot i_{p,t} + \sum_{p1}^P \sum_{p2}^P \sum_{s=1}^S RK_{p1,p2} \cdot r f_{p1,p2,s} \quad (3.22)$$

$$i_{p,t} = i_{p,t-1} + \sum_{s \in S_t} q_{p,s} - d_{p,t} \quad \forall t \in T, p \in P \quad (3.23)$$

$$\sum_p^P \sum_{s \in S_t} PZ_p \cdot q_{p,s} \leq K \quad \forall t \in T \quad (3.24)$$

$$q_{p,s} \leq \frac{K}{PZ_p} \cdot f s_{p,s} \quad \forall s \in S, p \in P \quad (3.25)$$

$$q_{p,s} \geq ML_p \cdot (f s_{p,s} - f s_{p,s-1}) \quad \forall s \in S, p \in P \quad (3.26)$$

$$\sum_p^P f_{s_p,s} = 1 \quad \forall p \in P \quad (3.27)$$

$$r_{f_{p1,p2,t}} \geq r_{s_{p1,t-1}} + r_{s_{p2,t}} - 1 \quad \forall p1, p2 \in P, t \in T \quad (3.28)$$

Symbol	Bedeutung
ML_p	Minimale Losgröße für Produkt p
S_t	Menge der Mikroperioden in Makroperiode t
s	Mikroperiode

Tabelle 3.3.: Zusätzliche Symbole des GLSP

3.1.2. Transport- und Flussprobleme

Transport- und Flussprobleme sind dann von Bedeutung, wenn ein Fluss von Waren von einer Menge von Anbietern zu einer Menge von Abnehmern durch ein Netzwerk mit diversen Restriktionen, Kosten und Zielfunktionen geleitet werden soll. Die Modellklasse ist vielfach beschrieben worden, u.a. von Suhl und Mellouli [SM05]. Neben der Verwendung beispielsweise für die Bestimmung maximaler Flüsse etwa in Pipelines, Verkehrs- oder Nachrichtennetzen wird es in allgemeiner Form als Umladeproblem genutzt, um die Abnehmernachfrage möglichst kostengünstig zu befriedigen. Das betreffende Netzwerk wird dazu als eine Menge von Knoten und gerichteten Kanten, also als gerichteter Graph, aufgefasst. Dabei gilt, dass jeder Knoten entweder ein Anbieterknoten, ein Abnehmerknoten oder ein Umladeknoten ist. Jedem Knoten wird eine Menge b zugeordnet, die im ersten Fall größer Null, im zweiten Fall kleiner Null und im dritten Fall gleich Null ist und deren Summe Null ergibt, d.h. das Angebot entspricht exakt der Nachfrage. Kanten besitzen Kosten pro Einheit, die über sie transportiert werden, sowie eine minimale und maximale Kapazität $l_{i,j}$ und $u_{i,j}$. Steht $x_{i,j}$ für die Menge der transportierten Einheiten über eine Kante (i, j) und $c_{i,j}$ für die Kosten pro transportierter Einheit über diese Kante, so wird mit der Maßgabe $\min \rightarrow \sum_i^N \sum_j^N c_{i,j} \cdot x_{i,j}$ unter den Restriktionen $\sum_j^N x_{j,i} - \sum_j^N x_{i,j} = b_i$ und $l_{i,j} \leq x_{i,j} \leq u_{i,j}$ der kostenminimale Fluss bestimmt.

3.1.3. Vehicle Routing-Probleme

Gemeinsam mit dem Losgrößenproblem ist das Routenplanungsproblem sicherlich eines der am meisten untersuchten quantitativen Planungsprobleme und ist in der Vergangenheit in einer Vielzahl von Varianten formuliert worden, sodass Anpassungen auf nahezu jedes Einsatzgebiet in der Praxis existieren. Tatsächlich wurden bereits Klassifikationsmodelle erarbeitet; nachfolgend wird die Charakterisierung nach Domschke [Dom97, S. 207ff] verwendet, die wiederum an diejenige von Desrochers et al. [DLS90] angelehnt ist. Sie benutzt ein 4-Tupel $[\alpha|\beta|\gamma|\delta]$ als Kurzschreibweise. Dabei steht α für einen Vektor, dessen Attribute die Depot- und Kundencharakteristik beschreiben, β für die Fahrzeugcharakteristik, γ für die Problem- oder Zusatzcharakteristik und δ für die Zielsetzungen. Das Symbol \circ steht für die häufigste Ausprägung und wird in der Notation ausgelassen.

Je nach den gewünschten Eigenschaften des Modells gibt es mehrere Möglichkeiten dieses mathematisch zu formulieren. Die häufigsten Ansätze sind die Vehicle Flow Formulation, die Commodity Flow Formulation und das Set Partitioning Problem (vgl. [Mag81]). Erste- re weist jeder Kante eine Binärvariable zu, die anzeigt, ob ein Fahrzeug diese Kante befährt oder nicht. Bei der Commodity Flow Formulation zeigen zusätzliche Integer-Variablen den Materialfluss zwischen Knoten an und sind in der Hinsicht mit den in 3.1.2 vorgestellten Problemen vergleichbar. Modelle, die auf dem Set Partitioning Problem beruhen, weisen einer Binärvariablen jeweils eine gültige Tour zu und suchen dann nach der optimalen Kombination von Touren.

3.1.3.1. Ausprägungen des α -Parameters

An dieser Stelle wird die grundlegende Struktur des Graphen beschrieben und welche Beschränkungen an den Knoten oder Kanten bestehen. Aus diesem Grund heißt der Parameter bei Desrochers et al. „Adressen“.

- $\alpha_1 \in \{1, p\}$: Anzahl der Depots
- $\alpha_2 \in \{\circ, edge, mixed, task\}$: Bedarfe bestehen auf Knoten (Problem des Handlungsreisenden), auf Kanten (Briefträgerproblem), auf beiden oder Abholung- und Anlieferung erfolgen innerhalb der Tour.
- $\alpha_3 \in \{\circ, split\}$: Erlaubnis von Teillieferungen

- $\alpha_4 \in \{\circ, p/d\}$: Reines Sammel-/Distributionsproblem oder Pickup&Delivery
- $\alpha_5 \in \{\circ, fs, tw, stw, mtw\}$: Vorhandensein von zeitlichen Beschränkungen (keine, fester Bedienzeitpunkt, hartes Zeitfenster, Zeitfenster mit Strafkosten, mehrere Zeitfenster)
- $\alpha_6 \in \{\circ, prec\}$: Vorhandensein von Reihenfolgebeziehungen
- $\alpha_{7,knotenorientiert} \in \{\circ, R, sel, clus\}$: Auswahl der zu bedienenden Knoten (alle, Teilmenge, Auswahl, ein Knoten aus jedem Cluster)
- $\alpha_{7,kantenorientiert} \in \{\circ, R\}$: Auswahl der zu bedienenden Kanten (alle, Teilmenge)

Bei Desrochers et al. findet sich zusätzlich die Unterscheidung zwischen deterministischem und stochastischem Bedarf und bei Teillieferungen wird nach a priori und a posteriori Aufteilung unterschieden.

3.1.3.2. Ausprägungen des β -Parameters

Dieser Parameter gibt Auskunft über die zur Verfügung stehenden Fahrzeuge und eventuelle Restriktionen diese betreffend.

- $\beta_1 \in \{\circ, M\}$: Anzahl der Fahrzeuge (unbegrenzt, begrenzt)
- $\beta_2 \in \{\circ, cap, cap_i\}$: Kapazität der Fahrzeuge (unbegrenzt, identisch begrenzt, individuell begrenzt)
- $\beta_3 \in \{\circ, tw, tw_i\}$: Zeitbeschränkungen der Fahrzeuge (keine, identische Zeitfenster, individuelle Zeitfenster)
- $\beta_4 \in \{\circ, dur, dur_i\}$: Beschränkung der maximalen Dauer einer Tour (keine, identische Beschränkung, individuelle Beschränkung)
- $\beta_5 \in \{\circ, R/F\}$: Touren pro Fahrzeug (maximal eine, mehr als eine)

Desrochers et al. bieten die Möglichkeit durch einen weiteren Index multidimensionale Restriktionen abzubilden, z.B. cap_i^2 für volumen- und gewichtsbeschränkte Fahrzeuge. Zusätzlich ist es möglich zu spezifizieren, dass alle Fahrzeuge genutzt werden müssen. Außerdem wird unterschieden, ob ein Fahrzeug Vorrichtungen für die Trennung von Gütern oder für den Transport spezieller Güter besitzt.

3.1.3.3. Ausprägungen des γ -Parameters

Diese Parameter beschreiben den Zusammenhang zwischen Graph und Fahrzeug genauer und treffen eine Aussage über den Planungshorizont.

- $\gamma_1 \in \{\circ, dir, mix\}$: Art des Graphen (ungerichtet, gerichtet, gemischt)
- $\gamma_2 \in \{\circ, K/F\}$: Zuordnungsrestriktion von Fahrzeug zu Knoten/Kante
- $\gamma_3 \in \{\circ, period\}$: Planerstellung für eine oder mehrere Perioden

Desrochers et al. gehen hier noch sehr viel tiefer ins Detail. Für den Graphen kann festgelegt werden, ob die Entfernungen zwischen Knoten der Dreiecksungleichung entsprechen. Außerdem werden Restriktionen der Zuordnung von Depots zu Knoten, von Depots zu Fahrzeugen und von Knoten miteinander aufgeführt, die jeweils gemeinsam vorkommen müssen oder nicht dürfen. Zusätzlich ist offen, ob das Fahrzeug am selben Depot ankommen muss, an dem es gestartet ist, und ob eine Abstimmung zwischen Fahrzeugen notwendig ist.

3.1.3.4. Ausprägungen des δ -Parameters

Domschke führt vier Zielkriterien an, die den δ -Parameter ausmachen, diese sind (vgl. 2.1.3):

- L: Minimierung der Entfernung
- FZ: Minimierung der Fahrzeit
- M: Minimierung der eingesetzten Fahrzeuge/Touren
- FK: Minimierung der Fahrtkosten

FK ist definiert als Linearkombination der drei Kostenarten, jeweils gewichtet mit den Kosten pro km, zeitabhängigen Löhnen und fixen Fahrzeugkosten. Desrochers et al. sehen auch eine Maximierung der Zielfunktion ebenso wie eine Auslassung der Zielfunktion für eine reine Machbarkeitsbewertung vor. Zusätzlich gibt es einen Kostenfaktor für die Verletzung weicher Restriktionen, etwa für das Zuspätkommen.

3.1.3.5. Standardprobleme

Analog zu Losgrößenproblemen haben sich auf Grund der vielen Problemcharakteristika einige Standardprobleme herausgebildet, die an dieser Stelle betrachtet werden. Das grundlegende Vehicle Routing Problem ordnet Fahrzeugen anzufahrenden Knoten zu, so dass jeder Knoten von genau einem Fahrzeug besucht wird. Ziel ist es, die Gesamtfahrleistung aller Fahrzeuge zu minimieren. Toth und Vigo [TV02, S. 12] führen folgende Formalisierung an:

$$\min. \rightarrow \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} c_{i,j} x_{i,j} \quad (3.29)$$

$$\sum_{i \in V} x_{i,j} = 1 \quad \forall j \in V \setminus \{0\} \quad (3.30)$$

$$\sum_{j \in V} x_{i,j} = 1 \quad \forall i \in V \setminus \{0\} \quad (3.31)$$

$$\sum_{i \in V} x_{i,0} = K \quad (3.32)$$

$$\sum_{j \in V} x_{0,j} = K \quad (3.33)$$

$$\sum_{i \notin S} \sum_{j \in S} x_{i,j} \geq r(S) \quad \forall S \subseteq V \setminus \{0\}, S \neq \emptyset \quad (3.34)$$

$$x_{i,j} \in \{0, 1\} \quad \forall i, j \in V \quad (3.35)$$

Dies ist das grundlegende Problem als Vehicle Flow Model. Die zu besuchenden Knoten sind in der Menge V enthalten, Knoten 0 ist darunter das Depot, an dem die Fahrzeuge Touren starten und beenden. Neben der bereits erwähnten Zielfunktion 3.29 werden sechs Restriktionen benötigt. Die Restriktionen 3.30 und 3.31 stellen sicher, dass jeder Knoten von einem Fahrzeug angefahren wird, das diesen Knoten auch wieder verlässt. Die Restriktionen 3.32 und 3.33 fordern, dass jedes Fahrzeug seine Tour am Depot beginnt und

beendet. Restriktion 3.34 ist die so genannte Capacity Cut Constraint, die dafür sorgt, dass Touren untereinander verbunden sind, und dass die Kapazitätsrestriktion eingehalten wird. Schließlich muss die Variable x binär sein, da sie anzeigt, ob eine Kante von einem Fahrzeug befahren wird oder nicht. Die verwendeten Symbole sind in Tabelle 3.4 zusammengefasst.

Symbol	Bedeutung
$x_{i,j}$	Indikator, ob die Kante von i nach j befahren wird
$c_{i,j}$	Fahrtkosten zwischen den Knoten i und j
K	Menge der Fahrzeuge
r	$r(S)$ ist die minimale Anzahl von benötigten Fahrzeugen, um Teilmenge S zu bedienen
V	Menge der Knoten

Tabelle 3.4.: Symbole des VRP

Eine wichtige Erweiterung des VRP ist das Vehicle Routing Problem with Time Windows (VRPTW). Es erlaubt das Setzen von Zeitfenstern für die Anfahrt jedes Knotens, sodass Zeitrestriktionen innerhalb der Periode abgebildet werden können. Wiederum basiert die Formalisierung auf der von Toth und Vigo [TV02, S. 158]. Sie benutzt eine um einen Index erweiterte Variable x , um die Fahrzeuge voneinander zu unterscheiden, und teilt das Depot auf die Knoten 0 und $n+1$ auf. Die für die Einhaltung der Zeitfenster benötigten Restriktionen sind:

$$w_{i,k} + s_i + t_{i,j} - w_{j,k} \leq (1 - x_{i,j,k}) \cdot M \quad \forall k \in K, i, j \in N \quad (3.36)$$

$$a_i \sum_{j \in N} x_{i,j,k} \leq w_{i,k} \leq b_i \sum_{j \in N} x_{i,j,k} \quad \forall k \in K, i \in N \quad (3.37)$$

$$E \leq w_{i,k} \leq L \quad \forall k \in K, i \in \{0, n+1\} \quad (3.38)$$

Restriktion 3.36 stellt sicher, dass die Zeitfenster für die Knoten i und j eingehalten werden, wenn die Kante von i nach j von einem Fahrzeug befahren wird. Zwischen den

Ankunftszeiten an diesen Knoten muss zeitlich mindestens die Summe aus Service- und Fahrzeit verstrichen sein. Restriktion 3.37 sorgt dafür, dass der gewählte Anfahrzeitpunkt innerhalb des gesetzten Zeitfensters liegt. Zuletzt fordert Restriktion 3.38, dass die Fahrzeuge ihre Touren innerhalb der frühesten Abfahrts- und Ankunftszeiten am Depot liegen.

Symbol	Bedeutung
$w_{i,k}$	Anfahrzeitpunkt an Knoten i von Fahrzeug k
a_i	Frühester Anfahrzeitpunkt an Knoten i
b_i	Spätester Anfahrzeitpunkt an Knoten i
E	Depotöffnung
L	Depotschließung

Tabelle 3.5.: Zusätzliche Symbole des VRPTW

3.1.4. Koordinierte modellbasierte Verfahren

Unter koordinierten Modellen werden solche verstanden, die simultan für mindestens zwei aufeinanderfolgende Stufen der Lieferkette planen, wobei sich mehrere Stufen innerhalb eines Unternehmens befinden können und auch einzeln beplant werden könnten. In der Regel wird aber an einer Stelle eine Unternehmensgrenze überschritten. Stufen sind Unternehmensfunktionen, die geplant werden müssen, z.B. Produktion, Lagerhaltung und Distribution. Entsprechend der Problemstellung werden an dieser Stelle Modelle zum stufenübergreifenden Master Planning, also der kurz- bis mittelfristigen Planung der Produktionsmengen, und zum Scheduling klassifiziert.

3.1.4.1. Modellklassifikation nach Sarmiento und Nagi

Ein Klassifikationsschema stufenübergreifender Modelle findet sich bei Sarmiento und Nagi [SN99]. Dieses unterscheidet zunächst nach dem betrachteten Ausschnitt der Lieferkette. Von 3.1.4.1.3 bis 3.1.4.1.5 werden die drei relevanten Ausschnitte vorgestellt. Zuvor erfolgt in 3.1.4.1.1 die Betrachtung mehrstufiger Lagerhaltung und in 3.1.4.1.2 die Bestimmung gesamtoptimaler Produktions- und Bestellmengen im statischen Fall als Einleitung ohne Bezug zu Transporten.

Nach dem Ausschnitt aus der Lieferkette unterscheidet das Schema zunächst danach, ob es nur reguläre Transporte oder auch Eiltransporte gibt. Anschließend wird nach der Kardinalität von Anbietern und Abnehmern getrennt. Nach der Aufteilung in Modelle mit und ohne Routenfindung findet letztlich noch die Trennung zwischen stochastischen und deterministischen Modellen statt. Eillieferungen und stochastische Modelle werden im Folgenden nicht betrachtet.

3.1.4.1.1. Lagerhaltung-Lagerhaltung

Diese Problemklasse abstrahiert Produktion und Transport und betrachtet ausschließlich die Bestimmung der Bestelllosgrößen, zwischen den Stufen der Supply Chain, bpsw. Einzel- und Großhändler als zweistufiges System. Dieses Problemfeld wird unter der Beachtung von zwischenbetrieblicher Abstimmung von Völkl [Völ06] untersucht. Völkl geht dabei von der von Heskett und Ballou [HB67] formulierten These aus, dass die optimalen Bestellmengen zweier aufeinanderfolgender Stufen nicht übereinstimmen. Es werden sowohl für den statischen als auch für den dynamischen Fall linearer und divergenter Lagerhaltungsstufen Verfahren zur Bestimmung der gesamtoptimalen Bestellmengen hergeleitet.

3.1.4.1.2. Produktion-Lagerhaltung

Analog zum Adler'schen Losgrößenmodell existiert das Joint Economic Lot Sizing Problem (JELP, vgl. [Goy77]²), das nicht nur die Bestellmengenplanung, sondern auch die Produktionslosgrößenplanung adressiert. Als statisches Problem betrachtet es eine 1:1-Beziehung zwischen Lieferant und Abnehmer. Transporte werden nicht berücksichtigt, die Vorlaufzeit ist null und Fehlmengen sind nicht erlaubt. Der Abnehmer bestellt regelmäßig ein bestimmtes Gut und hat die Bestellmenge nach der Adler'schen Losgrößenformel, also entsprechend der Bestell- und Lagerhaltungskosten, auf eine deterministisch statische Menge optimiert. Ebenfalls kann der Lieferant, da er das Bestellverhalten kennt, die Produktionslosgröße basierend auf Rüst- und Lagerhaltungskosten bestimmen. Diese Produktionslosgröße ist abhängig von der Bestelllosgröße; der Zyklus des Produzenten wird ein ganzzahliges Vielfaches des Zyklus des Abnehmers sein. Die Annahme ist, dass sich eine Produktions- und Bestelllosgröße finden lässt, die die Gesamtkosten minimiert. Goyal leitet das Verhältnis von Produktions- zu Bestelllosgröße im koordinierten Fall her und bestimmt daraufhin die gesamtoptimalen Produktions- und Bestellintervalle. An Hand

²Goyal selbst hat diese Bezeichnung nicht verwendet, sie findet sich erst später, z.B. bei [BDDE08]

eines Beispiels wird die Gesamtkostenminimierung demonstriert und darauf hingewiesen, dass einer der Beteiligten immer auf Kosten des anderen profitiert und daher Ausgleichszahlungen notwendig sind. Darauf aufbauend sind weitere Varianten untersucht worden (vgl. [BDDE08]), insbesondere unter der Annahme, dass die Lagerhaltungskosten beim Abnehmer höher sind als beim Lieferanten. Es kann gezeigt werden, dass die optimale Politik aus ungleichen Liefermengen besteht.

3.1.4.1.3. Distribution-Lagerhaltung

Diese Problemklasse betrachtet die Distribution von einem oder mehreren Lagern aus zu einem oder mehreren Abnehmern. Das Distributions-Lagerhaltungs-Problem für einen Anbieter und mehrere Abnehmer ist strukturell äquivalent zum bekannten Inventory-Routing-Problem (IRP, vgl. [CCKS98]), welches die Belieferung einer Anzahl von Kunden, die einen konstanten Verbrauch aufweisen, von einem Lager aus beschreibt. Der Unterschied liegt darin, dass das IRP die Optimierung aus Sicht der Distribution betreibt, d.h. es stellt zwar die Versorgung der Kunden sicher und vermeidet Fehlmengen, bezieht aber keine eventuellen Lagerhaltungskosten in die Zielfunktion mit ein. Demgegenüber stellt das Distributions-Lagerhaltungs-Problem die vollständige Integration zweier vormals getrennt voneinander geplanter Planungsdomänen dar. Die Entscheidungsgrößen sind Liefermengen und Touren, die unter Beachtung von Lagerhaltungskosten aller Beteiligten, evtl. Kosten für Fehlmengen, und fixen und variablen Transportkosten optimiert werden müssen.

Der Zusammenhang zwischen statischer Bestellmengenoptimierung und resultierenden Tourplänen ist von Soukal [Sou98] untersucht worden. Dazu wurde eine Menge von Lieferanten eines gemeinsamen Abnehmers angenommen (es liegt also die Kardinalität $n:1$ vor), die individuelle, nicht abgestimmte Lieferzyklen besitzen, die über die traditionelle Losgrößenformel bestimmt wurden, da die Bedarfsmengen deterministisch und statisch sind. Dabei werden die resultierenden Transportkosten vernachlässigt. Diese können sprunghafte Unterschiede aufweisen, wenn die Transporte als Sammeltour durchgeführt werden, denn die Menge der realisierbaren Touren hängt von den Bestellzyklen ab. Nur Lieferanten, die in der gleichen Periode liefern, können auf einer Tour gemeinsam bedient werden. Im Sinne einer Gesamtkostenminimierung sollten die Probleme und ihre Abhängigkeiten gemeinsam betrachtet werden. Durch ein iteratives, auf dem Savings-Algorithmus (vgl. [SM05, S. 247ff.]) nach Clark und Wright basierendes Verfahren werden Touren- und Bestellintervalle ermittelt und Einsparungen erzielt.

3.1.4.1.4. Lagerhaltung-Distribution-Lagerhaltung

Diese Modellklasse erweitert die vorhergehende um die Betrachtung des Lagerbestands des oder der Lieferanten. Es ist also zusätzlich zu beachten, dass die ausgelieferten Waren zuvor selbst bezogen werden müssen. Für gewöhnlich fallen dafür bestelfixe Kosten an, außerdem werden die Lagerhaltungskosten des Lieferanten mit einbezogen. Für den dynamischen Fall eines einzelnen Lieferanten mit mehreren Abnehmern und Routing ist dies von Chandra untersucht worden [Cha93]. Weitere Modelle sind nicht bekannt.

3.1.4.1.5. Produktion-Lagerhaltung-Distribution-Lagerhaltung

Bei dieser Modellklasse wird die vorherige um die Produktion erweitert. Wiederum stellt sich die Frage nach der Kardinalität von Lieferanten und Abnehmern. Viel beachtet worden ist das Problem mit einem Lieferanten und mehreren Abnehmern. Diese Konstellation bietet sich an, da sie, die Steuerung des abnehmerseitigen Lagers durch den Lieferanten vorausgesetzt, lediglich unternehmensinterner Maßnahmen zur Planung bedarf. Sarmiento und Nagi geben jeweils ein Beispiel für Modelle mit und ohne Routenfindung. Bezüglich der Thematik dieser Arbeit sind solche mit Routenfindung interessant. In dieser Kategorie ist die Arbeit von Chandra und Fischer [CF94] eine der am häufigsten zitierten. Hier wird ein Produzent betrachtet, der ein Lager unterhält und mit einer Flotte von LKW den dynamischen und deterministischen Bedarf mehrerer Kunden befriedigt. Für die integrierte Betrachtung wurde ein lineares Optimierungsmodell aufgestellt (von den Autoren Production Scheduling and Distribution Problem genannt), das zur Lösung allerdings nicht genutzt wird. Es besteht aus einem CLSP zur Abbildung der Produktion und einem VRP zur Abbildung des Transports. Zur Lösung kommt eine Heuristik zum Einsatz, die als Ausgangslösung die Sukzessivlösung nutzt. Die Teillösungen werden dafür jeweils getrennt gelöst, das CLSP mittels eines mathematischen Optimierers zur Optimalität, das VRP mittels einer Kombination aus Heuristiken, u.a. des Sweep-Algorithmus. Die koordinierte Lösung wird mittels einer Verbesserungsheuristik erreicht, die die sukzessive Lösung als Startlösung nutzt. Zur Verbesserung wird geprüft, ob sich bestimmte Lieferungen zusammenlegen lassen und sich dafür ein gültiger Produktionsplan bestimmen lässt. Bei jeder Iteration wird die bestmögliche Zusammenlegung gewählt, bis sich keine Verbesserung mehr finden lässt. Chandra und Fischer haben für bestimmte Szenarien Einsparungen von 20% gegenüber der sukzessiven Produktions- und Transportplanung festgestellt. Boudia [Bou06] untersucht ein nahezu identisches Problem, das sich

nur durch die Hinzunahme von Lagerhaltungskosten auf der Produktionsstufe unterscheidet. Das Produktionsteilmodell entspricht wiederum einem CLSP, das Transportmodell einem Split Delivery Vehicle Routing Problem (SDVRP), welches die Belieferung eines Abnehmers durch mehrere Fahrzeuge in einer Periode erlaubt. Während das Produktionsmodell optimal gelöst wird, kommt für das Transportmodell eine Tabu-Heuristik zum Einsatz. Ebenso wie Chandra/Fischer wird für die integrierte Lösung eine erste Iteration zur Bestimmung der sukzessiven Lösung durchgeführt, auf die weitere Iterationen zur Verbesserung folgen, die auf einer Veränderung des Produktionsplans beruhen. Einsparungen von 3,5% bis 21,7% werden je nach Szenario erzielt. Auch die Arbeit von Fumero und Vercellis [FV99] macht Gebrauch von nahezu denselben Annahmen wie die vorherigen Ansätze, löst das integrierte Modell jedoch über Zerlegung in Teilmodelle und die Anwendung von Lagrange-Multiplikatoren. Die Ergebnisse zeigen Verbesserungen von 8,9% bis zu 11,4% je nach Szenario. Ein Modell, das auf Small Bucket-Produktionsplanung beruht, ist nicht bekannt. Zwar führen Ertogral et al. [EWB98] zwei Zeitebenen zur Grob- und Feinplanung ein, doch sind Zeitfenster als Parameter vorgegeben und kein Ergebnis der Produktionsplanung bzw. des Verbrauchs. Ein statisches Modell dieser Problemklasse wurde bereits 1978 von Buch [Buc78] vorgestellt.

Der in dieser Arbeit behandelte Fall „Mehrere Lieferanten/Ein Abnehmer“ wird in der Klassifikation nicht aufgeführt. Somit wäre der Fall „Mehrere Anbieter/Mehrere Abnehmer“ beachtenswert, da er als Sonderfall das vorherige Szenario beinhalten könnte. Allerdings weisen Sarmiento und Nagi hierfür keine Modelle mit Routenplanung aus. Die Arbeit von Yung et al. [YTIW06] bewegt sich lediglich auf taktischer Ebene.

3.1.4.1.6. Produktion-Lagerhaltung-Distribution-Lagerhaltung-Produktion

Dieser Fall wird in der Klassifikation nicht berücksichtigt, findet sich jedoch in der Arbeit von Hofmann [Hof95]. Dieser betrachtet eine zweistufige Lieferkette mit jeweils einem Produzenten, die durch einen Transportdienstleister verbunden sind, und untersucht sie mit Hilfe eines statischen Losgrößenmodells. Die Losweitergabe erfolgt offen, die Produktionsgeschwindigkeiten sind endlich und die Transportgeschwindigkeit unendlich. Es bestehen ganzzahlige gleichgroße Relationen zwischen der Losgröße des Lieferanten und der Transportlosgröße sowie der des Produktionszyklus des Abnehmers und des Transportzyklus. Kostenwirksam sind jeweils fixe Kosten für Rüst- und Transportvorgänge sowie Lagerhal-

tungskosten. Die Ergebnisse der Sukzessivplanung werden mit denen der Simultanplanung der gesamten bzw. einer Teilmenge der gesamten Lieferkette verglichen. Die Einsparungen liegen, sofern keine annähernde produktionssynchrone Anlieferung stattfindet, unter 10%.

3.1.4.2. Fazit

Der Fall Produktion-Lagerhaltung-Distribution-Lagerhaltung mit mehreren Produzenten und nur einem Kunden hat gegenüber dem gespiegelten Problem mit nur einem Produzenten, aber mehreren Abnehmern kaum Beachtung gefunden. Zudem sind Transporte in Supply Chain-Modellen entweder nicht beachtet oder stark abstrahiert worden. Dies wird von Voß und Woodruff bestätigt: „A rather new research area is the problem of simultaneously planning production and transportation [...]“ [VW06, S. 205]. Die Erfassung des Stands der Technik zeigt, dass die Thematik noch nicht erschöpfend behandelt wurde; Standardmodelle wie zur Losgrößenplanung oder der Routenplanung existieren nicht.

3.2. Belieferungsverfahren in der Automobilindustrie

In der Automobilindustrie haben sich Standardbelieferungsverfahren herausgebildet, die mittels weniger Parameter variiert werden können. Als grundsätzliches Klassifikationsmerkmal dient die Einteilung in lagerlose und einstufige lagerhaltige Belieferungskonzepte. Mehrstufige Lagerhaltung wird nicht berücksichtigt. Neben der theoretischen Unterteilung wird im zweiten Abschnitt betrachtet, wie diese Konzepte ausgewählt und logistisch umgesetzt werden.

3.2.1. Theoretische Konzepte der Belieferungsverfahren

Im Folgenden werden die in der VDA-Empfehlung 5010 [Ver08] genannten Standardbelieferungsverfahren aufgeführt. Dazu werden zunächst lagerlose und lagerhaltige Verfahren unterschieden. Die in der Praxis anzutreffenden Varianten werden weiterhin gemäß folgender für diese Arbeit relevanten Merkmale kategorisiert:

- Lager-/Produktionsstandort: abnehmernah, abnehmerfern, Regionallager

- Produktionssteuerung/Lagersteuerung: Verbrauchssteuerung, Reichweitensteuerung, Auftrags-Reihenfolgesteuerung, Resequenzierung
- Dispositionsverantwortung: Abnehmer, Lieferant
- Abruf-/Lieferfrequenz: monatlich, wöchentlich, täglich, untertäglich

3.2.1.1. Lagerlose abnehmergesteuerte Belieferungsverfahren

Lagerlose Belieferung ist die extremste Ausprägung des Lean-Gedankens, d.h. der Annahme, dass Bestände nicht nur teuer sind, sondern auch Probleme verdecken. Daher wird für bestimmte Teile vollständig auf Lagerhaltung verzichtet. Die Produktion kann bei entsprechender Vorlaufzeit abnehmerfern erfolgen oder wird bei kurzfristigen Abrufen abnehmernah in Lieferantenparks durchgeführt. Die Steuerung erfolgt nach Verbrauch, Reichweite oder im Fall von JiS produktionssynchron. Die Dispositionsverantwortung liegt für JiS beim Abnehmer, bei JiT kann diese auch auf den Lieferanten übertragen werden. Die Abruffrequenz ist üblicherweise täglich oder untertäglich.

3.2.1.1.1. Just-in-Time

Just-in-Time (dt. „genau rechtzeitig“) ist in Anlehnung an Wildemann (vgl. [Wil98, S. 332]) das Konzept der Produktion und Anlieferung kleinstmöglicher Mengen zum spätest möglichen Zeitpunkt. Der Ansatz entspringt der aus Japan stammenden Überzeugung, dass Verschwendung³ jeglicher Art vermieden werden muss. Außerhalb Japans herrscht oft die Ansicht, dass Zulieferer in naher Entfernung zum Abnehmer angesiedelt sein müssen, um JiT-Belieferungen zu ermöglichen. Aus diesem Grunde sind auch viele Lieferantenparks entstanden. Kaneko und Nojiri [KN08] liefern allerdings eine Studie zur JiT-Belieferung in der japanischen Automobilindustrie, die diese Annahme widerlegt. Durch die exakt termingerechte Anlieferung sinken Durchlaufzeiten und Lager sowie Puffer sind nicht erforderlich, sodass gebundenes Kapital und innerbetriebliche Transporte reduziert werden. Mit dem Konzept sind auch Nachteile verbunden, so vor allem, dass eine optimale Kapazitätsauslastung durch die Eliminierung von Zeitpuffern verhindert wird (vgl. [Gud05, S. 263]). Gudehus geht sogar so weit einen Bedeutungsverlust zu attestieren und eine „Abkehr von der minuten- oder stundengenauen Anlieferung und die Einführung der ein- oder mehrtagesgenauen Anlieferung“ [Gud05, S. 264] festzustellen.

³jp.: Muda, „Anything that does not add value to the product or service, whether material, equipment, space, time, energy, systems, or human activity of any sort.“ [Hal87, S. 24]

3.2.1.1.2. **Just-in-Sequence**

Die Just-in-Sequence-Belieferung (JiS) geht noch einen Schritt weiter als JiT und fordert zusätzlich die Anlieferung in Verbaureihenfolge, sodass bei variantenreichen Teilen die Sequenzierung beim Abnehmer entfällt. Voraussetzung ist selbstverständlich eine stabile Produktionsreihenfolge, weswegen das Konzept der Perlenkette (vgl. [Wey02]), d.h. der frühzeitigen Fixierung der Produktionstermine einzelner Aufträge, eng mit JiS verbunden ist. JiS-Umsetzungen sind wie JiT-Umsetzungen zu klassifizieren.

3.2.1.2. **Lagerhaltige Belieferungsverfahren**

Die lagerlose Belieferung stellt hohe logistische Anforderungen, wird jedoch für einen Großteil der Belieferungen verwendet. Besonders für Teile mit geringem Wert oder starken Bedarfsschwankungen kommen hingegen lagerhaltige Konzepte zum Tragen. Diese teilen sich nach der Art der Steuerung in zwei grundsätzliche Klassen. Die Verantwortung der Belieferung kann auf den Abnehmer oder den Lieferanten übertragen werden. Die Ausgestaltung dieses Parameters hat weitreichende Folgen für die Planung der Produktion und des Transports, da sie unmittelbar die Gestaltungsspielräume der Beteiligten bestimmt. Die Lagerhaltung findet in der Regel abnehmernah statt.

3.2.1.2.1. **Abnehmergesteuert**

Hier werden drei Varianten unterschieden. Die Besonderheit bei der KANBAN-Steuerung liegt darin, dass sich das Lager abnehmerfern befindet. Die Charakteristika der Bedarfe sind denen bei JiT-Prozessen ähnlich, d.h. eine relativ zu den anderen vorgestellten Prozessen gute Vorhersagbarkeit der Bedarfe und hohe Varianz der beschafften Teile sowie hoher Teilewert und hoher Bedarf. Bis auf den zwischenbetrieblichen Transport und die übermittelten Bedarfsprognosen stimmt das Konzept mit dem aus der Produktionslogistik überein.

Die Variante Lieferabruf entspricht weitgehend dem klassischen Bestellprozess (vgl. [Bec08, S. 273] und angelehnte Darstellung in Abbildung 3.2), also der Übermittlung fester Bestellmengen und -termine auf Basis einer lokal optimalen Steuerung des Abnehmers. Der Prozessschritt „Bestellmenge ermitteln“ zieht auch in der Praxis durchaus Transportkosten

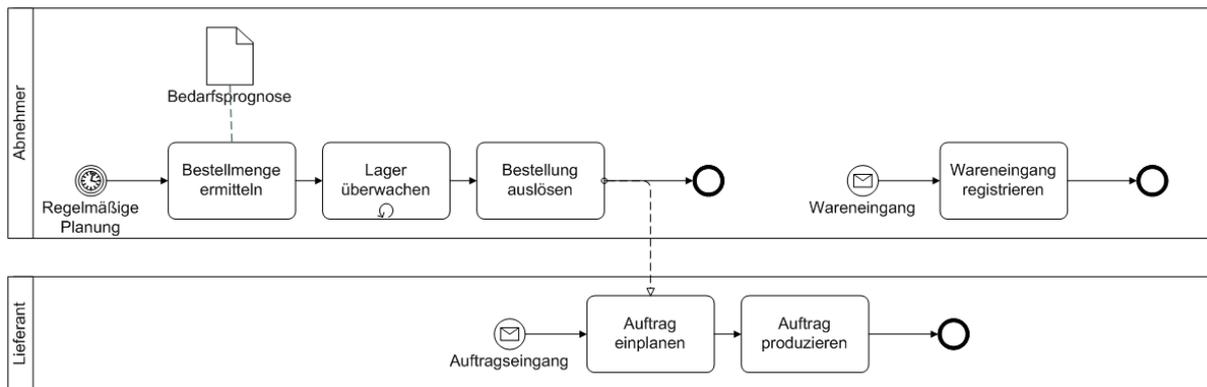


Abbildung 3.2.: Klassischer Bestellprozess

in die Betrachtung mit ein, allerdings sind keine Methoden bekannt, die dies für Sammeltouren auf Routen abbilden. Die Ermittlung beruht auf Verbrauchssteuerung. Der Pick-up-Sheet-Prozess gleicht dieser Variante, allerdings werden die Abrufe regelmäßig, z.B. an einem bestimmten Tag der Woche, übermittelt. Die benötigten Mengen und Termine basieren auf einer Reichweitensteuerung.

3.2.1.2.2. Lieferantengesteuert

Die Übertragung der Verantwortung für die Steuerung der Bestände auf die Lieferanten wird mit dem Begriff „Vendor Managed Inventory“ (VMI, vgl. Abbildung 3.3) bezeichnet. Im Gegensatz zu anderen Konzepten gewinnt der Lieferant beim VMI an Spielraum, da keine festen Mengen abgerufen werden, sondern lediglich Mindest- und Maximalbestände vereinbart wurden, die Entscheidung, wann und welche Mengen geliefert werden, ist gänzlich den Lieferanten überlassen. Dadurch können diese sowohl Produktions- als auch Transportlosgrößen nach eigenen Prioritäten und Restriktionen optimieren. Für den Abnehmer entfällt Planungsaufwand ohne Planungssicherheit einzubüßen (vgl. [Gra07, S. 438], [HHMT08, S. 468ff.]). Dennoch ist er für einen guten Erfolg des Verfahrens verantwortlich, da er stets aktuelle Daten über Prognosen und Entnahmen übermitteln muss, die wiederum die Grundlage für die Planung der Lieferanten darstellen. Da der Abnehmer keinen direkten Einfluss auf die Bestandshöhe hat, wird das abnehmernahe Lager meist als Konsignationslager geführt. Zugleich entfällt die Notwendigkeit einer zusätzlichen abnehmerfernen Lagerhaltung, die auf Kosten von Beständen ebenfalls eine lokale Produktionsoptimierung ermöglichte. Lediglich ein Versandpuffer wird noch gebraucht.

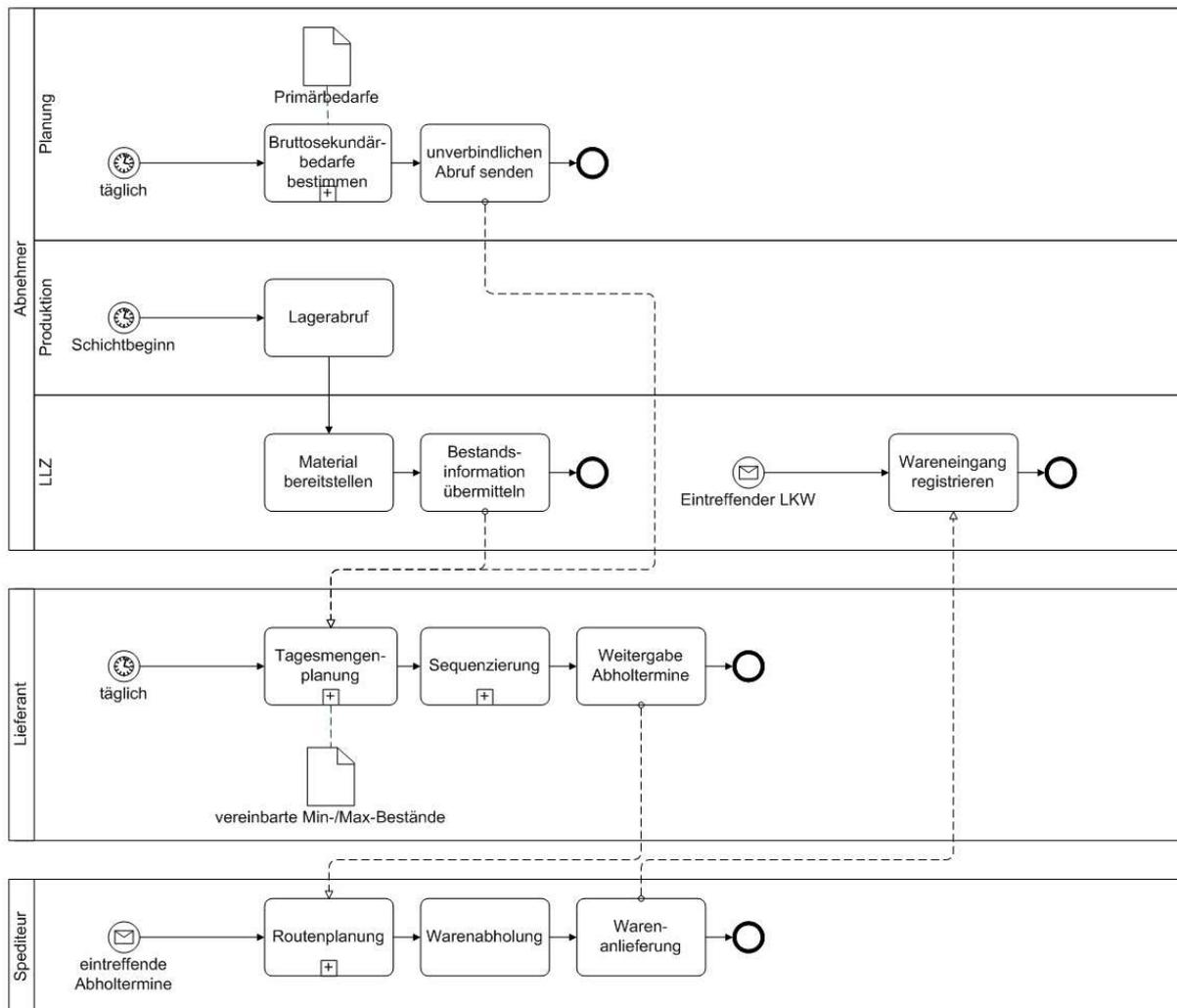


Abbildung 3.3.: Belieferungsform VMI als Prozess

Nach Darstellung der Daimler AG ist dies das einzige genutzte lagerhaltige Belieferungsverfahren und verantwortlich für die Beschaffung von etwa 25% des Gesamtbedarfs.

3.2.1.3. Kooperationen in der Distributionslogistik

Beim Einsatz eines VMI-Belieferungsverfahrens kommt es zunächst zu einer stärkeren vertikalen Kooperation zwischen den Beteiligten, da ein solches Verfahren nur bei einer längerfristigen und vertrauensvollen Partnerschaft gute Ergebnisse erzielen kann. Gleichzeitig kommt es jedoch auch dazu, dass es unter den Lieferanten, die einen gemeinsamen Kunden besitzen, zu einem gemeinsamen Interesse, der effizienten Belieferung dieses Kunden, kommt und sich somit die Möglichkeit einer horizontalen Kooperation bietet.

Solche existieren beispielsweise im Konsumgüterbereich (z.B. Kosmetik- und Reinigungsmittelhersteller oder Tiefkühlwarenhersteller) bereits. Dort schließen sich Hersteller für die Belieferung des Handels zusammen, um somit Kosten zu sparen und die Rampenkontakte zu reduzieren (vgl. [Zen08]). In eine solche Kooperation mit eingebunden ist ein einzelner Logistikdienstleister. Aber auch LDL können sich zu horizontalen Kooperationen zusammenschließen, etwa um flächendeckend Dienste anbieten zu können ohne das Risiko einer Expansion einzugehen oder einen Zusammenschluss mit einem anderen Unternehmen anzustreben.

3.2.2. Praktische Umsetzung der Belieferungsverfahren

Für die praktische Umsetzung eines Belieferungsverfahrens ist dies in einem ersten Schritt auszuwählen, da die vorgestellten Verfahren unter verschiedenen Rahmenbedingungen mehr oder weniger geeignet sind. Steht dieses fest und werden keine Vollladungen erzielt, so ist die Organisation der Ladungskonsolidierung zu bestimmen.

3.2.2.1. Auswahl des Belieferungskonzeptes

Ein Belieferungsverfahren wird üblicherweise auf Teileebene festgelegt. Die VDA-Empfehlung 5010 [Ver08] schlägt eine dreistufige Vorgehensweise vor: Zuordnung durch übergeordnete Rahmenbedingungen, Zuordnung durch Standardkriterien und Zuordnung durch Zusatzkriterien. Aus planerischer Sicht besonders interessant sind die Standardkriterien, die die Dimensionen „Einzelteilwert, Jahresbedarf und Volumen“ einerseits, sowie „Stetigkeit, Vorhersagegüte und Varianz“ andererseits festlegen. Hohe Werte in diesen Kategorien sprechen jeweils für eine lagerlose Beschaffung.

3.2.2.2. Sammelgutverkehr und Milk Runs

Als maßgebliche Konzepte für die konsolidierte Anlieferung von Waren werden der Sammelgutverkehr und als Sonderform der Milk Run vorgestellt. Beide Begriffe sind in der VDA-Empfehlung 5002 [Ver97] definiert. So wird der Sammelgutverkehr als „das Sammeln der von den Verladern übergebenen, in der Regel kleingewichtigen Einzelsendungen (Stückgüter), die Zusammenfassung zu einer Sammelladung und die Verteilung der Einzelsendungen an die einzelnen Empfänger“ beschrieben. Ein Milk Run hingegen „ist eine

Sonderform des Direkttransportes auf einer festgelegten Route (i.d.R. feste Zeit, feste Menge, feste Strecke) mit vorgegebenen Abholzeiten und Eintreffzeiten von Abholadressen direkt an einen Empfänger, i.d.R. ohne Einbeziehung einer Umschlagsanlage⁴. Es wird auch vom umladungsfreien Teilladungsverkehr gesprochen. Ein Milk Run stellt also höhere Anforderungen an die Stetigkeit der Bedarfe, da Bedarfsschwankungen sonst zu Sondertransporten führen, oder aber die Fahrzeuge in der restlichen Zeit schlecht ausgelastet sind. Die Einrichtung eines Milk Runs nimmt durchaus mehrere Wochen in Anspruch, da viele Randbedingungen geprüft werden. So ist es teilweise erforderlich, dass Lieferanten Vorrichtungen haben, um LKW seitlich beladen zu können oder aber der Abholzeitpunkt muss abgestimmt sein. Weiterer Abstimmungsbedarf besteht u.a. hinsichtlich der Stapelfähigkeit und Abmessungen der Ladungsträger, des Gewichts des Ladungsträgers und der Teile und der Zeitfenster der Beteiligten einschließlich der Öffnungszeiten der Warenein- und -ausgänge (vgl. [Sto07b, S. 98]). Dass Milk Runs als Alternative zu nicht ausgelasteten Direktrelationen Kosten und Schadstoffemissionen sparen können, zeigen Seidl und Wolff [SW07] an einem Beispiel innerhalb der Logistik-Standardsoftware 4flow vista, sowie Baudin [Bau04, S. 33f]. Sammelladungen sind gesetzlich über §460 HGB geregelt.

Bretzke [Bre08, S. 67ff] hält die Bündelung von Warenströmen für ein gewichtiges Zukunftsthema, da „Infrastrukturengpässe, Mautgebühren, restriktive Regelungen für die Einsatzzeiten von Fahrern, Energiekosten und ein wachsendes Umweltbewusstsein zwangsläufig zu einer Verteuerung von Transporten führen müssen“. Er sieht die heutigen Logistikkonzepte in Frage gestellt und fordert intelligentere Methoden. Der Nutzen einer Bündelung soll daran gemessen werden, ob der ungenutzte Laderaum bei Transporten die Kosten erhöhter Bestände übersteigt.

3.3. IT-gestützte Verfahren zur Koordination

Ohne IT-Unterstützung sind Unternehmen heutzutage nicht mehr beherrschbar. Informationssysteme übernehmen die Datenhaltung, die Steuerung von Prozessabläufen und die Optimierung von Geschäftsentscheidungen. Begonnen hat die Entwicklung produk-

⁴Die Begrifflichkeiten sind in der Literatur keinesfalls streng definiert. Während ein Direktverkehr von manchen Autoren als jeglicher Verkehr ohne Umschlag angenommen wird [FRRS08], erlauben andere wie in der vorliegenden Definition des VDA durchaus das Einsammeln von Gütern bei verschiedenen Lieferanten. Gleiches gilt für den Sammelgutverkehr, der bei Wlcek [Wlc98, S. 28] als gebrochen und ungebrochen vorkommt, bei Pankratz [Pan02, S. 32] jedoch als gebrochen dargestellt wird.

tionswirtschaftlicher IT-Systeme mit Material Requirements Planning-Systemen (MRP), die in den 1960-1970er Jahren aufkamen und vor allem die Materialbedarfsplanung unterstützten (vgl. [Kur05, S. 105]). Werden zusätzlich auch die verfügbaren Kapazitäten in die Planung mit einbezogen, so wird von Manufacturing Resource Planning (MRP II) gesprochen. Damit einher geht das Konzept, dass die Produktionsplanung nicht losgelöst von der Absatzplanung erfolgen soll, d.h. es wird eine vertikale Integration innerhalb des Unternehmens angestrebt (vgl. [Kur05, S. 136]). Heute werden Unternehmenssoftwarelösungen als Enterprise Resource Planning-Systeme (ERP) bezeichnet. Sie haben sich aus einzelnen Lösungen für Funktionsbereiche, neben der Produktion beispielsweise auch der Personalplanung, entwickelt und weisen innerhalb eines Unternehmens eine hohe vertikale und horizontale Integration auf. Für die Bereiche Produktion und Logistik werden Teilsysteme des ERP, die weitreichende Fähigkeiten insbesondere zur Feinplanung und Optimierung bieten, als Advanced Planning and Scheduling bzw. als Advanced Planning Systems (APS) bezeichnet (vgl. [Kur05, S. 367]). Als nächster Schritt in der Entwicklung dieser Systeme ist die Abstimmung mit vor- und nachgelagerten Unternehmen und deren Planungssystemen notwendig.

Die Möglichkeiten zur unternehmensübergreifenden Planung mittels APS-Systemen werden in Abschnitt 3.3.1 erläutert. In Abschnitt 3.3.2 folgt eine Betrachtung eines online-basierten Systems speziell für die Automobilindustrie. Abschließend werden in Abschnitt 3.3.3 Transportbörsen als Anwendung für Logistikdienstleister vorgestellt.

3.3.1. SAP SCM

Der Markt für Unternehmenssoftware wird von der SAP AG beherrscht, die 2008 einen Anteil von 32,8 % daran aufweisen konnte (vgl. [SAP08, S. 2]). Daher wurde die APS-Komponente des SAP ERP-Systems, SAP SCM (früher SAP APO), als Beispiel gewählt. Die weitere Übersicht folgt der von Buxmann et al. [BKF⁺04] gegebenen Darstellung.

SAP SCM besteht aus mehreren Modulen für verschiedene Aufgaben. Die für den hier betrachteten Problembereich relevanten sind PP/DS (Production Planning and Detailed Scheduling) und TP/VS (Transport Planning and Vehicle Scheduling). Die Komponente SNP (Supply Network Planning) bietet eine standortübergreifende Planung auch unter Berücksichtigung von Transportkapazitäten, ist mit einer Genauigkeit von maximal einem Tag jedoch als Big Bucket-Lösung anzusehen. Insgesamt setzen die SAP-Lösungen derzeit

vor allem darauf, Transparenz über Bestände und prognostizierte Bedarfe im Netzwerk zu schaffen und Konflikte schnell zu übermitteln, „collaborative processes in the procurement area are so far only rudimentary supported“ [BKF⁺04, S. 76].

3.3.1.1. Koordinierte Planung mit Zulieferern

Das Modul zur Produktionsfeinplanung ist PP/DS und baut auf den mittels SNP bestimmten Daten auf. PP/DS plant bis auf eine Minute genau und bezieht weitere Kostenfaktoren und Restriktionen mit ein, beispielsweise Rüstzeiten- und -kosten. Eine direkte Verbindung zur Transportplanung ist allerdings nicht vorgesehen. Buxmann et al. heben die Vorteile eines gemeinsamen Produktionsmodells mehrerer Betriebe hervor, betonen aber gleichzeitig, dass die heutigen Systeme noch zu sehr für den Einsatz innerhalb eines Unternehmens entworfen sind, als dass sich dies einfach realisieren ließe.

3.3.1.2. Koordinierte Planung mit Spediteuren

Die Transportplanung erfolgt mit TP/VS. Hier können Direktlieferungen oder Sammeltouren unter Beachtung vielfältiger Restriktionen erstellt werden. Es besteht die Möglichkeit diese Aufträge direkt aus dem System heraus auszuschreiben, eintreffende Gebote nachzuverfolgen und die Auftragsvergabe zu bestätigen, vgl. 3.3.3. Mittels des TLB (Transport Load Builder) ist es außerdem möglich, die Transportkapazitäten möglichst optimal auszulasten. Wiederum liegt eine Sukzessivplanung vor, bei der sich nachfolgende Planungseinheiten nach vorgegebenen Plänen richten und kein Informationsrückfluss vorgesehen ist.

3.3.2. SupplyOn

SupplyOn⁵ ist ein elektronischer Marktplatz, der webgestützte Lösungen zur Zusammenarbeit von Unternehmen u.a. in der Automobilindustrie anbietet. Es wurde als Beispiel ausgesucht, da es sich im Besitz von vier großen Zulieferbetrieben der Automobilindustrie sowie der SAP AG befindet. Es bietet Unterstützung in den Bereichen Einkauf, Qualität, Logistik und Finanzen, sodass die Mehrzahl der zwischenbetrieblichen Prozesse im Supply Chain Management über diese Plattform abgewickelt werden kann.

⁵<http://www.supplyon.com/>

Der Haupteinsatzzweck von SupplyOn ist der Ein- und Verkauf von Gütern, der über Ausschreibungen und Auktionen getätigt werden kann. Doch auch andere Funktionen werden unterstützt, so auch die Einbindung der Logistikdienstleister in den Informationsfluss. Im Bereich VMI wird vor allem bezweckt, aktuelle Informationen über Lagerbestände zugänglich zu machen und vor Unterschreitungen des Mindestbestandes zu warnen. Kooperative Planungsprozesse sind nicht vorgesehen.

3.3.3. Transportbörsen

„Transportbörsen vermitteln auf Basis des Internets zwischen Laderaumangebot und -nachfrage“ [SRTW08, S. 594], d.h. sie sind konzeptionell ein Instrument für den Spediteur, um Fahrzeuge besser auszulasten, bzw. für den Versender, um Transportvolumen günstig zu beziehen. Obwohl Transportbörsen nicht zwingend an das Medium Internet gekoppelt sind und es bereits in den 1970er Jahren Ansätze auf Basis anderer Kommunikationstechnologien gab, so schafft doch erst diese Infrastruktur einen schnellen und transparenten Markt. Eine umfassende Übersicht zu Transportbörsen findet sich bei Sängler [Sän04].

Transportbörsen lassen sich hinsichtlich zahlreicher Kriterien unterscheiden, etwa des verwendeten Verhandlungsmechanismus oder der Betreiberstruktur. Besonders wichtig ist die Unterscheidung zwischen Spot- und Kontraktmärkten (vgl. [Sän04, S. 82]). Über Kontraktmärkte werden Rahmenverträge vermittelt, innerhalb derer Teilaufträge ausgeführt werden. Spotmärkte werden für einzelne, genau definierte und kurzfristig anstehende Aufträge genutzt. Auf dem Spotmarkt eingekaufte Frachtkapazitäten sind in der Regel teurer als solche, die längerfristig beschafft werden⁶.

Transportbörsen vermitteln demzufolge lediglich bereits festgelegte Relationen und stellen kein kooperatives Planungswerkzeug dar, auch wenn sie einige der gewünschten Ziele unterstützen. So kann der Einkäufer die Dienstleistung möglichst günstig beziehen, während die Verkäufer Aufträge annehmen können, die für sie vorteilhaft sind. Dennoch gibt es Probleme; Sängler nennt unter anderem die mangelnde Attraktivität der ausgeschriebenen Angebote sowie die unzureichende Qualität der Marktteilnehmer, die aus den kurzen Geschäftsbeziehungen resultiert (vgl. [Sän04, 110 ff.]).

⁶Ein großes deutsches Speditionsunternehmen schätzt den Zuschlag auf 10-30 %.

3.4. Verfahren zur dezentralen Koordination

Bei den Verfahren zur dezentralen Koordination lässt sich ein großer Unterschied zwischen dem theoretisch erarbeiteten Stand der Technik und den tatsächlich erfolgten Einsätzen in der Praxis ausmachen. Während die Grundlagen der Koordinationsmethoden und die für ihren Einsatz notwendigen IT-Systeme umfassend akademisch bearbeitet wurden, lassen sich kaum Beispiele für erfolgreiche Anwendungen finden. An dieser Stelle werden beide Aspekte betrachtet und Gründe für die vorliegende Diskrepanz gegeben.

3.4.1. Theoretische Grundlagen

In der Literatur wird umfangreich beschrieben, auf welche Arten sich dezentrale Koordination erreichen lässt. Eine umfassende Übersicht zu Koordinationsverfahren im Supply Chain Management findet sich bei Breiter et al. [BHHS09]. Die Darstellung hier beschränkt sich auf solche Verfahren, die dem Thema der Arbeit entsprechend operativ angewandt werden können. Im Folgenden werden zunächst vier maßgebliche Methoden beschrieben, danach folgt eine Beschreibung der technologischen Basis zu deren Umsetzung.

3.4.1.1. Methodische Grundlagen

3.4.1.1.1. Hierarchische Antizipation

Bei der hierarchischen Antizipation wird von einer unkoordinierten Sukzessivplanung zwischen zwei Planungsstufen ausgegangen. Besitzt jedoch die vorgelagerte Stufe, genannt „Top Level“ Annahmen darüber, wie sich die nachgelagerte Stufe, genannt „Base Level“ verhalten wird, so kann ohne bilaterale Abstimmung eine Entscheidung getroffen werden, die das Resultat auf ein bestimmtes Ziel hin optimiert. Dazu werden die getrennten Entscheidungsmodelle, also das bekannte Top Level-Modell und das angenommene Base Level-Modell hintereinander ausgeführt, das Resultat geprüft und die Rahmenbedingungen im Top Level-Modell für den nächsten Lauf angepasst, bis eine möglichst starke Annäherung an das Ziel erreicht wurde. Dieser Mechanismus ist bspw. von Schneeweiß und Zimmer [SZ04] beschrieben worden. Bei dieser Methode kommt es zu keiner echten Zusammenarbeit und es wird kein gemeinsames Ziel verfolgt. Es ist zu beachten, dass

durch diese Methode zwar eine Koordination erreicht wird, die Anforderungen des Base Level aber nur so einbezogen werden, dass der Top Level davon profitiert. Dessen Entscheidungen sind bindend.

3.4.1.1.2. Auktionen

Auktionen beruhen auf der Annahme, dass knappe Güter oder Ressourcen an denjenigen Akteur vergeben werden, der den größten Nutzen daraus ziehen kann. Es existiert eine Vielzahl von Methoden, um diesen Nutzen wahrheitsgemäß zu ermitteln. Die bekannteste Form ist die „englische Auktion“, bei der Bieter öffentlich aufsteigende Gebote abgeben. Jeder Bieter hat einen eigenen Wert für das versteigerte Gut und wird in kleinen Schritten bis zu einem Preis mitsteigern, der diesem Wert entspricht. Demnach bekommt der Gewinner den Zuschlag zu einem Preis, der dem privaten Wert des zweithöchsten Bieters entspricht, der bei diesem Preis nicht mehr mitbietet. Entsprechend werden bei der „Holländischen Auktion“ die Gebote verringert, bis einer der Bieter sich zum Kauf entschließt. Werden die Gebote verdeckt abgegeben und das höchste Gebot bekommt sofort den Zuschlag, so wird von einer „First-price sealed-bid“-Auktion gesprochen. Bei dieser Variante kann der Gewinner einen Preis zahlen, der über dem des privaten Wertes des zweithöchsten Bieters liegt, da er das Verhalten der anderen Teilnehmer nicht beobachten kann. Eine Variante hiervon ist die „second-price sealed-bid“ oder Vickrey-Auktion. Bei dieser gewinnt das höchste Gebot, zahlt aber nur den Preis des zweithöchsten Gebots. Es kann gezeigt werden, dass dies dazu führt, dass die Teilnehmer Gebote abgeben, die der tatsächlichen Einschätzung ihres privaten Wertes entsprechen. Auktionen bilden einen freien Markt ab und eignen sich besonders für lose oder kurzfristige Geschäftsbeziehungen.

3.4.1.1.3. Self Selection

Self Selection, auch als Selbstwahlmechanismus oder Screening bezeichnet, beschreibt den der hierarchischen Antizipation vergleichbaren Vorgang, dass bei der Abstimmung zwischen zwei Planungsstufen dem Base Level mehrere Auswahlmöglichkeiten geboten werden. Anstatt also die Auswahl im Top Level auf Annahmen basierend zu treffen, wird die Entscheidung abgegeben, wodurch das Base Level durch die Wahl der präferierten Alternative auch gleichzeitig Informationen zu seiner eigenen Zielsetzung preisgibt.

3.4.1.1.4. Automatisierte Verhandlungen

Unter automatisierten Verhandlungen wird ein technologiegestützter Suchprozess in einem Vertragsraum verstanden, der effektiv gegenseitig vorteilhafte Parameter findet (vgl. [Fin04]). Durch die Automatisierung werden Abläufe ermöglicht, die bei manueller Arbeit prohibitiv hohe Transaktionskosten verursachen würden. Da automatisierte Verhandlungen in Bezug auf IT und Prozesse gründlich vorbereitet werden müssen und einen fortgeschrittenen Grad an gegenseitigem Vertrauen benötigen, kommen sie vorrangig für längerfristige und tiefgreifende Kooperationen in Frage.

Unter den Veröffentlichungen der letzten Jahre hat besonders diejenige von Dudek [Dud04] Beachtung gefunden. Hier wird beschrieben, wie eine Einigung durch den iterativen Austausch von Vorschlägen und Gegenvorschlägen erreicht werden kann. Dabei wird zunächst ein Auftragsvorschlag vom Abnehmer an den Lieferanten gesendet. Dieser evaluiert ihn und generiert einen leicht zu seinem Vorteil abgeänderten Liefervorschlag als Kompromiss. Sodann wird dieser vom Abnehmer evaluiert und die Iteration beginnt erneut. Dieses Verfahren beschränkt den Austausch auf unkritische Informationen und arbeitet jederzeit mit gültigen Plänen, sodass auch beim Scheitern des Koordinationsprozesses ein umsetzbares Ergebnis vorliegt.

Auch bei Fink [Fin04] wird ein ähnliches Verfahren beschrieben, hier allerdings nicht für Bestell- bzw. Liefermengen, sondern für die Abstimmung zweier Produktionssequenzen. Dazu wird ein generelles Protokoll entworfen, das dem von Dudek ähnlich ist, jedoch eine Dritte Partei, den Mediator, einschließt. Von diesem wird die Verhandlung gesteuert. Auf Basis seiner Kenntnis des Vertragsraums generiert er Vorschläge, die von den beiden beteiligten Agenten angenommen oder abgelehnt werden können. Wird der Vorschlag von beiden Seiten akzeptiert oder ist eine gewissen Anzahl von Iterationen abgeschlossen bzw. eine gewisse Zeit verstrichen, so wird der Vertrag angenommen.

3.4.1.2. Technische Grundlagen

3.4.1.2.1. Multiagentensysteme

Wooldridge definiert einen Agenten als „a computer system that is situated in some environment, and that is capable of autonomous action in this environment in order to

meet its design objectives“ [Woo02, S. 15] und ergänzt die folgenden Anforderungen für intelligente Agenten ([Woo02, S. 23]), von denen im Folgenden ausgegangen werden soll:

- **Reaktivität:** Intelligente Agenten nehmen ihre Umwelt wahr und können kurzfristig auf Änderungen reagieren, um ihre Ziele zu erreichen.
- **Eigeninitiative:** Intelligente Agenten können die Initiative ergreifen, um ihre Ziele zu erreichen.
- **Soziale Fähigkeiten:** Intelligente Agenten können mit anderen Agenten und/oder menschlichen Akteuren interagieren, um ihre Ziele zu erreichen.

Ein Multiagentensystem (MAS) ist folglich ein System, das aus mehreren Agenten besteht, die ein gemeinsames Ziel erreichen wollen oder aber individuelle Ziele haben und um Ressourcen konkurrieren. Russel und Norvig [NR03, S. 41ff.] haben eine Liste von Merkmalen aufgestellt, mit deren Hilfe die Umwelt beschrieben werden kann, in der sich ein Agent befindet. Die Dimensionen sind folgende:

- **Beobachtbarkeit (voll/teilweise)** beschreibt, ob ein Akteur seine Umwelt vollständig wahrnimmt oder zu jeder Zeit jeweils nur einen Ausschnitt.
- **Vorhersagbarkeit (deterministisch/stochastisch)** beschreibt, ob die Auswirkungen des Handelns eines Agenten auf die Umwelt vollständig berechenbar sind oder einer Unsicherheit unterliegen.
- **Nachhaltigkeit (periodisch/sequentiell)** beschreibt, ob Aktionen von vorangegangenen Aktionen abhängig sind.
- **Verlässlichkeit (statisch/dynamisch)** beschreibt, ob sich die Umwelt auch ohne Einfluss eines Akteurs verändern kann.
- **Kontinuität (diskret/kontinuierlich)** beschreibt, wie die Zeit in der Umwelt abgebildet wird.
- **Interaktionsdichte (ein Akteur/mehrere Akteure)** beschreibt, wie viele Akteure sich in der Umwelt befinden.

Woelk et al. [WRZN06, S. 77ff.] benutzen diese Kriterien, um die Eignung einer agentenbasierten Modellierung für das Supply Chain Management einzuschätzen, und kommen zu der Überzeugung, dass diese gegeben ist. Das Geschäftsumfeld ist für einzelne Akteure nur eingeschränkt beobachtbar, stochastisch, sequentiell, dynamisch, kontinuierlich und durch

eine Vielzahl von Marktteilnehmern geprägt. Auch nach den Leitfragen von Wooldridge [Woo02, S. 225] ist diese Übereinstimmung gegeben, da insbesondere Daten und Steuerung über mehrere Teilnehmer verteilt sind und ein Agent eine geeignete Metapher für ein Unternehmen im Markt ist. Ähnlich argumentieren auch Moyaux et al. [MCdD06, S. 16ff.].

3.4.1.2.2. Das FRISCO-Framework

FRISCO (Framework for Intelligent Supply Chain Operations) ist eine Ergänzung der Java-basierten Agentenplattform JADE (Java Agent Development Framework) und entstand am Heinz Nixdorf Institut der Universität Paderborn. Die zugrundeliegende Idee ist, dass agentenbasierte Software in zwei Ausprägungen existiert. Auf der einen Seite finden sich funktionsfähige Anwendungen, die auf einem nicht-technischen Level angepasst werden können (vgl. 3.4.2), auf der anderen Seite sind es generische Bibliotheken zur Entwicklung von Agentensystemen (z.B. JADE oder JADEx). Software und Entwicklungsmethoden für die Entwicklung domänenspezifischer Agentensysteme finden sich hingegen nicht. Bei der Analyse, welche Bestandteile ein für die Anforderungen des Supply Chain Managements bzw. einer anderen Anwendungsdomäne entwickeltes Framework aufweisen sollte, stellten sich fünf Bestandteile heraus:

- Agentenklassen: Agenten, die bereits Modelle und Methoden für ihren Einsatzzweck vorimplementiert haben
- Ontologien: eine Beschreibung der Domäne
- Protokolle: eine Übereinkunft, wie Koordination zwischen den Agenten erreicht wird
- Regelbibliothek: eine Methode zur internen regelbasierten Steuerung des Agenten, um auf Kodierung des Verhaltens verzichten zu können
- Entwurfsmethodik: ein Vorgehensmodell, das den Einsatz des Frameworks beschreibt

FRISCO ist derzeit das einzige domänenspezifische Framework zur Entwicklung von Agentensystemen. Eine genaue Beschreibung des Konzepts findet sich bei Hellingrath und Böhle [HB10]. Das Konzept ist im Laufe dieser Arbeit um Workflows ergänzt worden (vgl. 6.2.2).

3.4.2. Praxisorientierte Implementierungen

Nachfolgend sind einige Beispiele für existierende Implementierungen angeführt, die jedoch nahezu sämtlich dem akademischen Umfeld entstammen. Kommerzielle Lösungen sind kaum bekannt und befinden sich meist entweder noch im Teststadium (z.B. LS/ASN von Whitestein Technologies⁷), leiden an mangelnder Akzeptanz der Nutzer oder sind auf Grund ungeklärter rechtlicher Fragen (vgl. [Nit06], [GLPR07]) nicht im Einsatz. Eine Ausnahme ist das in 3.4.2.3 vorgestellte CoagenS, das sogar die Transportplanung mit einbezieht.

Lang et al. [LMSZ08] untersuchen die Literatur auf Hinweise, warum es MAS an Akzeptanz fehlt. Sie zählen als Haupthindernisse auf: Kosten, Sicherheit, juristische und ethische Probleme, Qualität der Ergebnisse, Skalierbarkeit, Benutzerakzeptanz, Bedeutung eines menschlichen Entscheidungsträgers, fehlende Professionalität in der Entwicklung, fehlende Standards, Altsysteme, Falschanwendung und die starke Verwurzelung im akademischen Umfeld.

Pěchouček und Mařík [PM08] geben Beispiele für den Industrieinsatz von MAS in verschiedenen Anwendungsgebieten, von denen die maßgeblichen Produktionssteuerung, Logistik, Produktionsplanung und Supply Chain-Integration sind. Im Bereich Produktionssteuerung wird erneut das DaimlerChrysler-Beispiel angeführt, außerdem ein System für eine Stahlfabrik, das um 1990 entwickelt wurde, aber nicht zum Einsatz kam. In der Logistik wurde ein großer Erfolg beim Einsatz einer Whitestein-Lösung für ein dynamisches VRPTW bei dem Unternehmen ABX beschrieben. Daneben wird noch eine weitere Anwendung zum Scheduling von Schiffen und LKW angeführt. Für die Produktionsplanung werden zwei Anwendungen genannt, die sich im Industrieinsatz befinden. In der Supply Chain-Integration, also dem Gebiet, wo die Dezentralität der Agentensysteme von entscheidender Bedeutung ist und nicht durch eine zentrale Lösung ersetzt werden kann, ist den Autoren keine Lösung bekannt, die sich im Einsatz befindet.

Leitão [Lei08] gibt zunächst eine Übersicht der Forschung zu MAS-basierten Produktionssystemen, beklagt aber im Anschluss den Mangel an industriellen Umsetzungen.

⁷Auf der Webseite des Unternehmens (<http://www.whitestein.com/autonomic-business-solutions/ls-asn-living-systems-adaptive-supply-networks>) heißt es: „LS/ASN is in conceptual stage and being developed to be able to demonstrate the optimization capabilities and cost saving potential. We are looking for pilot customers to further develop the solution.“ (Stand: November 2009)

Die bekannteste ist das Planungswerkzeug „Production 2000+“, das innerhalb von DaimlerChrysler verwendet wurde, um die Fertigung von Zylinderköpfen zu planen. Trotz scheinbar guter Ergebnisse liegen keine Informationen zu einem Nachfolgeprojekt vor; das Planungssystem wurde mit Ende des Produktlebenszyklus der Zylinderköpfe eingestellt. Leitão selbst hält die Anzahl der Implementierungen für zu gering, um von einem Beweis der Anwendbarkeit in der Praxis sprechen zu können. Die Gründe dafür sind ähnlich zu denen von Lang et al. Bezüglich der Akzeptanz wird weitergehend angeführt, dass MAS eine Vielzahl neuer und unerprobter Technologien mit sich bringen, bspw. Ontologien oder maschinelles Lernen.

3.4.2.1. MASCOT

MASCOT (Multi-Agent Supply Chain Coordination Tool) wird als „reconfigurable, multilevel, agent-based architecture for coordinated mixed-initiative supply chain planning and scheduling“ [SHKT99, S. 1] bezeichnet. Der zentrale Baustein dafür ist der Agenten Wrapper, der aus den Modulen Activation Controller, Graphical User Interface und Blackboard sowie mehreren Knowledge Sources besteht.

Ein Blackboard-System besteht aus zwei Komponenten (vgl. [Woo02, S. 307]): einer Menge von problemlösenden Entitäten, eben den Knowledge Sources, und einem gemeinsamen Datenspeicher, dem eigentlichen Blackboard, zur Kommunikation. Da alle Entitäten das Blackboard überwachen, stellen sie fest, wenn für sie lösbare Probleme durch andere Entitäten hinterlegt werden. Die Lösung wird wiederum auf dem Blackboard abgelegt und durch andere Entitäten genutzt oder weiterverarbeitet.

Die Knowledge Sources sind kein fester Bestandteil des Systems, sondern können je nach Einsatzzweck gewechselt werden, sodass etwa als Scheduling Module eine existierende Lösung eingebunden werden kann.

3.4.2.2. Agent.Enterprise

Agent.Enterprise [WRZN06] entstand innerhalb des Schwerpunktprogramms 1083 „Intelligente Softwareagenten und betriebswirtschaftliche Anwendungsszenarien“ der Deutschen Forschungsgemeinschaft und ist ein Multi-Multi-Agenten-System, das zwischen inner- und überbetrieblicher Planung unterscheidet. Die spezialisierten Planungssysteme für Montage oder Serienfertigung sind selbst Multi-Agenten-Systeme und werden über das System

DISPOWEB in der Supply Chain koordiniert, wodurch ein Multi-Multi-Agenten-System entsteht. Weitere Systeme können über Gateway-Agenten angeschlossen werden. Diese übernehmen die Aufgabe, Konzepte zwischen den Systemen zu übersetzen.

3.4.2.3. CoagenS

CoagenS (Cooperativ/kompetitive Agenten für das Gestalten und Betreiben von Produktionsnetzwerken der Serienfertigung) [Pap06] ist innerhalb eines vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Projekts entwickelt und zum Einsatz gebracht worden. Dabei handelt es sich um keine rein technische Lösung. In diesem Vorhaben wurde der bisherige Prozessablauf zwischen den Beteiligten im Liefermanagement neu definiert, um den Datenaustausch zu intensivieren und die Transparenz zu erhöhen. Der Spediteur wurde explizit mit in diese Abläufe integriert. Dieser Umstand zahlt sich insbesondere im Funktionsbaustein „Alternative Tourenplanung“ aus. Hierbei wird ein Optimierungszeitfenster zwischen Bereitstellungs- und Bedarfstermin ausgehandelt und dem Spediteur zur Verfügung gestellt, der daraufhin den tatsächlichen Transporttermin mitteilt. Erwähnenswert ist, dass CoagenS ein Konzept zur XML-basierten Modellierung von Prozessen mit Schnittstellen zu Java anbietet, um die Benutzbarkeit durch Experten für die jeweilige Domäne herzustellen. Das System basiert auf Lotus Notes und konnte die Anwender durch Prozessautomatisierung von vielen Routineaufgaben entlasten. Dieser direkt erfahrbare Nutzen hat zu einer hohen Akzeptanz in den am Projekt beteiligten Unternehmen geführt.

3.4.2.4. MUST

MUST (Multi-Site Scheduling System) wurde von Sauer als prototypische Implementierung eines Multi Site Scheduling-Konzepts (MSS) entworfen [Sau04]. Unter MSS wird die „Ablaufplanung bei verteilten, voneinander abhängigen Produktionsstandorten bzw. -einheiten“ [Sau04, S. 106] verstanden. Konzeptionell bezieht dies auch das Transport-scheduling mit ein, allerdings ist dies in MUST nicht umgesetzt.

MUST umfasst zwei Planungsebenen, die über einen Blackboard-Ansatz koordiniert werden. Auf der globalen Ebene werden die Aufträge eingeplant, die sich aus den von den angeschlossenen Betrieben zu liefernden Teilen zusammensetzen. Die resultierenden Aufträge oder Änderungen daran werden auf der globalen Ebene verwaltet und an die zuständige

lokale Ebene kommuniziert. Die Betriebe der lokalen Ebene können, Störungen ausgenommen, nur innerhalb des von der globalen Ebene gesetzten Rahmens planen. Zusätzlich empfängt die globale Ebene Nachrichten der lokalen Ebenen, z.B. Benachrichtigungen über Störungen, und reagiert entsprechend darauf. Die lokale Ebene bekommt über zwei Kanäle Nachrichten, auf die sie gegebenenfalls mit Umplanungen reagieren muss. Zum einen kommen Meldungen aus dem Betrieb, etwa zum Ausfall einer Maschine, zum anderen auf Meldungen der globalen Ebene, die eine neue Planungssituation auf Grund einer Änderung des globalen Plans oder einer nicht behebbaren lokalen Störung eines anderen Betriebes beschreiben können. MUST beschreibt dabei nicht die Planungsmodelle oder Algorithmen, sondern schafft die notwendige Struktur, um eine schnelle Kommunikation zu ermöglichen, sodass eine effiziente Reaktion auf ungeplante Ereignisse stattfinden kann. Dazu definiert MUST vor allem die auftretenden Ereignisse und die dazugehörigen Daten. Es existiert außerdem das Projekt DROPS, das insbesondere die Wiederverwendbarkeit der entworfenen Komponenten evaluiert.

3.4.2.5. Busch

Das von Busch entworfene Konzept [Bus04], das sich mit der interorganisationalen Änderungsplanung befasst, ist nur prototypisch umgesetzt worden, wird aber erwähnt, da es als einzige bekannte Arbeit explizit Logistikdienstleister integriert. Dazu werden zwei Wege aufgezeigt. Bei der direkten Integration wird der Logistikdienstleister in eine $n:1:m$ -Verhandlung eingebunden, also eine solche, in der ein Akteur Änderungen verhandeln muss, die Mengen von Lieferanten und Kunden betreffen. Busch spricht die Problematik an, dass kein Nutzenzuwachs zu erwarten ist, wenn der Logistikdienstleister von den übrigen Verhandlungen abhängig ist und sich sein Entscheidungsspielraum dynamisch ändert. Als vorteilhaft wird die indirekte Integration beschrieben, bei der der direkt eingebundene Verhandlungspartner seinerseits Verhandlungen mit dem Logistikdienstleister führt. Somit können in den direkten Verhandlungsprozess bereits abgestimmte Vorschläge eingebracht werden. Busch beschreibt die Verhandlungsprozesse sowie die technische Umsetzung.

4. Zu leistende Arbeiten

An dieser Stelle soll beschrieben werden, welche Arbeit zu leisten ist, um das in Kapitel 2 erläuterte Problem unter Berücksichtigung des verfügbaren Stands der Technik aus Kapitel 3 zu lösen. Da die Problemlösung mittels zweier unterschiedlicher Methoden erfolgen soll, ergibt sich die Aufteilung in folgende Teilprobleme:

- **Formalisierung der Problemstellung**

Um die Eigenschaften des untersuchten Problems eindeutig zu charakterisieren, soll es zunächst formalisiert werden. Dafür kann auf Klassifikationssysteme der Teilgebiete des untersuchten Problems zurückgegriffen werden.

- **Formulierung als lineares Optimierungsmodell**

Aus der formalen Problembeschreibung lässt sich die mathematische Formulierung ableiten, aus der wiederum ein lineares Optimierungsmodell gewonnen werden kann. Das Modell wird inklusive aller Parameter, Variablen und Restriktionen aufgestellt und beschrieben.

- **Generierung von Szenarien**

Um die neuen Verfahren zu testen, werden umfangreiche Daten benötigt. Dazu gehören Primärbedarfe des Abnehmers samt Stückliste, um Sekundärbedarfe abzuleiten. Bei den Zulieferern müssen diese um Supply Chain-externe Bedarfe ergänzt werden. Ebenfalls benötigt werden Kapazitäten, Entfernungen und Rüstzeiten. Szenarien müssen generiert, verwaltet und mit Ergebnissen ausgewertet werden können.

- **Problemlösung mittels einer Heuristik**

Die in dieser Arbeit integriert betrachteten Probleme sind beide sehr rechenintensiv bzw. NP-schwer. Daher wird ein heuristisches Verfahren entwickelt, um auch größere Probleminstanzen annähernd optimal lösen zu können. Das Verfahren wird durch

Algorithmen dokumentiert und in lauffähige Software übertragen. Probleme können sowohl sukzessiv als auch integriert gelöst werden, um Verbesserungen identifizieren zu können.

- **Problemlösung mittels eines Multiagentensystems**

Die beiden vorgenannten Lösungsverfahren sind in der Lage, den Nutzen der integrierten Planung zu quantifizieren. Da sie aber einige Annahmen machen, die nicht mit der Praxis vereinbar sind, wird eine weitere Methode entwickelt und getestet. Als technische Basis soll ein Multiagentensystem zum Einsatz kommen. Es ist dafür notwendig die Abläufe zwischen den Beteiligten in einen Prozess zu überführen und die zur Verhandlung notwendigen Protokolle zu spezifizieren.

Diese Teilprobleme werden in Kapitel 5 theoretisch behandelt. In Kapitel 6 wird die praktische Umsetzung dieser Ergebnisse beschrieben.

5. Darstellung der theoretischen und praxisorientierten Lösungskonzepte

Nachdem in Kapitel 2 die Thematik dieser Arbeit diskutiert und in Kapitel 4 die zu leistende Arbeit aufgeführt wurde, werden in diesem Kapitel Lösungskonzepte vorgestellt, die auf den bekannten Verfahren aus Kapitel 3 aufbauen. Dabei wird auf implementierungsspezifische Details weitgehend verzichtet, diese folgen in Kapitel 6.

5.1. Formalisierung des Planungsproblems

Die zwei grundlegenden Bestandteile dieser Arbeit, Losgrößen- und Tourenplanungsprobleme, sind in der Literatur vielfach und in zahlreichen Varianten bearbeitet worden. Dementsprechend gibt es Ansätze zur Klassifikation dieser Probleme (vgl. 3.1.1 und 3.1.3). Nachfolgend wird eine Einordnung der benötigten Eigenschaften der für diese Arbeit erforderlichen Modelle vorgenommen.

5.1.1. Klassifikation des Losgrößenproblems

Auf Basis der in 3.1.1 vorgestellten Klassifikationsmerkmale kann das Losgrößenmodell für den vorliegenden Problemfall charakterisiert werden. Bezüglich des Zeitmodells besteht die Herausforderung bei der Modellierung der Produktion darin, dass zwar ein Small Bucket-Ansatz benötigt wird, um Rüstreihenfolgen abzubilden, das Vehicle Routing-Modell jedoch Touren innerhalb einer einzigen Periode berechnet, deren Länge üblicherweise einem Tag entspricht. Da sich also die Zeitgranularität unterscheidet, muss hierauf besonders

geachtet werden. Der Planungshorizont wird endlich gewählt, da sich aus der Problemstellung auf Grund der beobachteten Schwankungen der benötigten Mengen über die Zeit kein statisches Modell ergibt. Die jeweiligen Werte werden allerdings als deterministisch angenommen, da sich ohne stochastische Einflüsse präziser der Nutzen der integrierten Planung bestimmen lässt. Weiterhin ist festzustellen, dass eine Betrachtung der Problemstellung nur unter Annahme schwankender Bedarfe sinnvoll ist und somit eine dynamische Formulierung benötigt. Dies folgt aus dem Abrufverhalten der Automobilhersteller, die wiederum auf Grund der Variantenvielfalt zu quantitativ stark schwankenden Abrufen neigen. Hofmann [Hof95] argumentiert, dass eine konstante Nachfrage realistisch sei, sofern das Unternehmen mittels Marketing mit dem Ziel der Glättung steuernd eingreift. Ohne weitere Belege erscheint dies, auch in Hinblick auf das tatsächliche Marktverhalten von Automobilherstellern, fragwürdig. Die Ressourcen werden als begrenzt nutzbar, jedoch ohne erforderliche Mindestauslastung angenommen. Die Produktionsgeschwindigkeit ist wiederum zur Bestimmung der Fertigstellungstermine endlich. Da in dieser Arbeit insbesondere die simultane Einbindung des Transports untersucht werden soll, wird die Modellierung der Lieferanten abstrahiert, indem dort jeweils nur eine Fertigungsressource angenommen wird. Eine mehrstufige bzw. parallele Produktion bei den Lieferanten würde die Komplexität des Modells ohne größeren Erkenntnisgewinn stark erhöhen. Weiterhin ergibt sich aus der Aufgabenstellung die Anforderung, dass nicht bloß reihenfolgeabhängige Rüstkosten durch das Modell ausgewiesen werden, um das Zielsystem der Lieferanten zu berücksichtigen, sondern darüber hinaus die Rüstzeiten zeitlich genau einkalkuliert werden, damit die Abholtermine innerhalb des Tages exakt bestimmt sind.

Über die Klassifizierungsmerkmale hinaus sind weitere, für das vorliegende Problem spezifische, Eigenschaften festzuhalten. Fehlmengen dürfen, auch nicht durch Kompensationszahlungen ausgeglichen, auf keinen Fall vorkommen. Ein unzureichender Lagerbestand führt mit hoher Wahrscheinlichkeit zu teuren Umplanungen oder sogar zum Stillstand der Produktion. Als Fehlmenge wird bereits das Unterschreiten des vereinbarten Mindestbestands angesehen. Das Modell soll es nicht erlauben, Teilmengen eines Loses zu transportieren, d.h. es soll eine geschlossene Produktion vorliegen. Der Grund dafür ist, dass Vorgänge wie beispielsweise das Bereitstellen am Warenausgang nur einmal pro Los durchgeführt werden sollen, um Kosten zu sparen. Eine Besonderheit des Modells besteht darin, dass zwei Arten von Produkten gefertigt werden; solche, die für den betrachteten Abnehmer produziert werden, und solche, die für einen Abnehmer außerhalb des betrachteten Supply Chain-Ausschnitts bestimmt sind. Da nur die Anlieferung zu einem Abneh-

mer eingeschlossen ist, brauchen die Supply Chain-externen Bedarfe nur produziert, nicht aber transportiert werden. Die Berücksichtigung ist dennoch notwendig, um das durch Rüstreihenfolgen bestimmte Zielsystem des Lieferanten abbilden zu können. Durch die angenommene eindeutige Zuordnung von Teilen zu Lieferanten, also dem Single Sourcing, kann darauf verzichtet werden, Produktions- und Rüstzeiten lieferantenspezifisch abzubilden. Es ist bislang implizit angenommen worden, dass die Losgrößenmodelle aller Lieferanten übereinstimmen. Dies wird in der Praxis nicht zu beobachten sein, ist allerdings durch den Zwang zur Abstraktion und die Problemstellung gerechtfertigt.

5.1.2. Klassifikation des Tourenplanungsproblems

Zur exakten Beschreibung der Art des Tourenplanungsproblems wird die in 3.1.3 vorgestellte Notation von Domschke bzw. Desrochers et al. verwendet. Demnach wird zunächst der Graph über den Parameter α beschrieben. Da die Koordination wie in 2.1 beschrieben nur über einen Spediteur stattfinden soll, gibt es entsprechend auch nur ein Depot. Zwar könnte ein Spediteur auch mehr als ein Depot besitzen, da aber die Betrachtung auf ein Gebiet beschränkt ist, wird mit großer Wahrscheinlichkeit ein einzelnes benutzt. Weiterhin liegt ein knotenorientiertes Problem vor, da der Bedarf am Abnehmerknoten entsteht. Teillieferungen sind aus Kostengründen auszuschließen, da sonst für ein Los eine mehrfache Abfertigung zu erfolgen hat, die zusätzliche Fahrstrecke verursacht, den Warenausgang blockiert (und somit potenziell Wartezeit entsteht) und Personal benötigt. Wie bereits beschrieben, handelt es sich um ein Problem, das die konsolidierte Abholung von Waren mehrerer Lieferanten und der Anlieferung zu einem gemeinsamen Abnehmer beschreibt und somit keine Lieferungen zwischen Lieferantenknoten umfasst. Zeitfenster sind durch den Bereitstellungs- und Bedarfszeitpunkt gegeben. Es handelt sich jeweils um harte Restriktionen, da Waren nicht vor der Produktion abgeholt werden können und ein Unterschreiten des Minimalbestandes im LLZ vertraglich ausgeschlossen ist. Eine Reihenfolgebeziehung für die Anfahrt der Lieferanten besteht nicht, es wird davon ausgegangen, dass alle Güter beliebig nacheinander eingeladen werden können. Die zu bedienenden Knoten sind eine Teilmenge aller Knoten und die Auswahl erfolgt entsprechend dem Bereitstellungsstermin des Lieferanten und der Zuordnung zum Fahrzeug. Die Eigenschaften der Fahrzeuge werden über den β -Parameter näher bestimmt. Es steht für die folgende Betrachtung eine unbegrenzte Anzahl von Fahrzeugen zur Verfügung, da Kapazitäten

jederzeit auf dem Spotmarkt¹ verfügbar sind, falls der Fuhrpark des Spediteurs nicht ausreichen sollte. Die Kapazität der Fahrzeuge ist zweifach durch Gewicht und Volumen begrenzt. Beide Restriktionen sind wichtig, da sowohl leichte, aber sperrige Teile, z.B. Wischwasserbehälter, als auch schwere, aber kompakte Teile, z.B. Schrauben, befördert werden können. Zeitbeschränkungen und Tourdauerbeschränkungen gelten identisch für alle Fahrzeuge bzw. Fahrer, außerdem fährt jedes Fahrzeug pro Tag nur eine Tour, bzw. eine weitere Tour wäre nicht mehr Gegenstand des betrachteten Modells. Der γ -Parameter ist lediglich für die mehrperiodische Betrachtung gesetzt, da der Graph in ungerichteter Weise die abstrahierten Verbindungen zwischen Werken darstellt und keine Restriktionen im Hinblick auf die Kombination von Fahrzeugen zu Werken oder Straßen bestehen, d.h. vor allem kann jedes Fahrzeug jeden Lieferanten anfahren. Auch bezüglich der weiteren Ausprägungen von Desrochers et al. treten keine weiteren Einschränkungen auf; es könnte lediglich angegeben werden, dass die Dreiecksungleichung eingehalten wird, da der Graph einen geographischen Sachverhalt abbildet. Die Zielfunktion und damit der δ -Parameter wird in 5.1.4.1 genauer diskutiert, prinzipiell wird aber eine Gesamtkostenminimierung verfolgt, die aber um einige Aspekte ergänzt wird. Damit ergibt sich ein Klassifikations-4-Tupel von $[1, tw, prec, R|cap^2, tw, dur|period|FK]$.

5.1.3. Klassifikation des integrierten Modells

Da das integrierte Modell mehrere Stufen der Lieferkette beplant, kann eine Einordnung des zugrundeliegenden Problems in die Klassifikation nach Sarmiento und Nagi, wie in 3.1.4.1 beschrieben, vorgenommen werden. Die betrachteten Stufen ergeben sich aus der Problemstellung und reichen von Produktion und Lagerhaltung beim Lieferanten über die Distribution bis zur Lagerhaltung im Lieferanten-Logistikzentrum. Entsprechend 5.1.1 handelt es sich um ein Finite Horizon-Modell. Durch die Festlegung des Transportmodus auf Sammeltouren sind Eiltransporte nicht vorgesehen. Die Kardinalitäten der betroffenen Örtlichkeiten ist $n:1$, d.h. es existieren mehrere Lieferanten und ein einzelner Abnehmer. Routenfindung ist ein vorgesehener integraler Bestandteil der Aufgabenstellung und die Vorhersehbarkeit der Bedarfe ist vollständig gegeben.

Die Besonderheit des hier vorgestellten Modells ist die Verknüpfung zweier Modelle, die üblicherweise mit unterschiedlichen Periodenlängen arbeiten. Während ein Small Bucket-Losgrößenmodell für gewöhnlich stunden- oder schichtweise plant, gehen Vehicle Routing-

¹Auf dem Spotmarkt werden kurzfristige Beförderungsaufträge gehandelt, vgl. 3.3.3

Modelle von jeweils einem Tag aus und bilden das Scheduling über Zeitfenster ab. Insofern, auch unter Berücksichtigung des Stands der Technik aus der Klassifikation integrierter Modelle, stellt das vorliegende Modell eine neue Klasse von Planungsproblemen dar, die mit „Integrated Vehicle Routing and Lot Scheduling Problem“ (IVRLSP) bezeichnet werden kann.

5.1.4. Mathematische Formulierung des integrierten Modells

An dieser Stelle kann nun das zuvor geschilderte Planungsproblem in eine exakte mathematische Formulierung überführt werden. Die verwendeten Symbole werden in Tabelle 5.1 erläutert; das vollständige Modell in der mathematischen Sprache OPL findet sich in Anhang A.1.

Symbol	Bedeutung
AW	Wert von Anschlussaufträgen
AZ	Zeitgrenze für Anschlussaufträge
$C_{i,j}$	Kraftstoffverbrauch zwischen zwei Knoten i und j
$DI_{p,t}$	Interner Bedarf an Teilen p in Mikroperiode t
$DE_{p,t}$	Externer Bedarf an Teilen p in Mikroperiode t
E	Spätest mögliche Anlieferung innerhalb einer Makroperiode
EK	Emissionskosten
$F_{i,j}$	Fahrtzeit zwischen zwei Knoten i und j
FR	Fahrerkosten
FZ	Fahrzeugeinsatzkosten
G_p	Gewicht von Produkt p
K	Kapazität der Lieferanten
K^{KG}	Kapazität der LKW in Kilogramm
K^{M3}	Kapazität der LKW in Kubikmetern
KK	Kraftstoffkosten
L	Menge der LKW
LK_p	Lagerhaltungskostensatz pro Mikroperiode für Produkt p
$LP_{z,p}$	Zuordnung von Produkt p zu Lieferant z
LS	LKW-Standkosten
M	Big M (große Zahl)

B_p^{max}	Maximalbestand für Produkt p beim Abnehmer
B_p^{min}	Minimalbestand für Produkt p beim Abnehmer
MR	Big M (große Zahl) für Rüstzeitzuweisung
MT	Anzahl der Makroperioden
N	Menge der Knoten
OK_z	Opportunitätskosten pro Mikroperiode bei Lieferant z
P	Menge der Produkte
PZ_p	Produktionszeit für Produkt p
R_{mt}	Menge der zur Makroperiode mt gehörigen Mikroperioden
$RZ_{p1,p2}$	Rüstzeit von Produkt p1 auf p2
S	Frühest mögliche Anlieferung innerhalb einer Makroperiode
ST_z	Servicezeit bei Lieferant z
T	Anzahl der Mikroperioden
TL	Länge einer Mikroperiode
V_p	Volumen von Produkt p
Z	Menge der Lieferanten
$a_{l1,l2,mt}$	Abstand des Eintreffens beim Abnehmer von LKW l1 und l2 in Makroperiode mt
$aa_{l,mt}$	Indikator für das Zustandekommen eines Anschlussauftrags mit Fahrzeug l in Makroperiode mt
$aae_{l,mt}$	Indikator für das Erreichen eines Anschlussauftrags mit einem zuvor eingesetzten Fahrzeug l in Makroperiode mt
$aa_{z,l,mt}$	Indikator für das zeitliche Erreichen eines Anschlussauftrags mit Fahrzeug l in Makroperiode mt
$ia_{p,t}$	Lagerbestand für Produkt p beim Abnehmer in Mikroperiode t
$il_{z,p,t}$	Lagerbestand für Produkt p bei Lieferant z in Mikroperiode t
$ls_{l1,l2,mt}$	Strafminuten für die Überschneidung von LKW l1 und l2 in Makroperiode mt
$q_{z,p,t}$	Losgröße von Produkt p bei Lieferant z in Mikroperiode t
$r_{z,p,t}$	Rüstindikator bei Lieferant z für Produkt p in Mikroperiode t
$ra_{z,t}$	Aufzuaddierende Rüstzeit für Lieferant z in Mikroperiode t
$ri_{z,p1,p2,t}$	Rüstindikator für einen Wechsel von Produkt p1 auf p2 in Mikroperiode t bei Lieferant z

$rl_{z,t}$	Indikator für laufenden Rüstvorgang bei Lieferant z in Mikroperiode t
$rz_{z,t}$	Rüstkähler bei Lieferant z in Mikroperiode t
tp_{i,j,p,l,t_s,t_e}	Materialfluss von Produkt p zwischen den Knoten i und j von Zeitpunkt t_s bis t_e mittels LKW l
$w_{i,l,mt}$	Anfahrzeitpunkt von Fahrzeug l an Knoten i in Makroperiode mt
$wia_{l,mt,t}$	Zeitfensterindikator für den Abnehmer und Fahrzeug l in Makroperiode mt und Mikroperiode t
$wil_{z,l,mt,t}$	Zeitfensterindikator für Lieferant z und Fahrzeug l in Makroperiode mt und Mikroperiode t
$x_{i,j,l,mt}$	Bewegung von Fahrzeug l zwischen den Knoten i und j in der Makroperiode mt

Tabelle 5.1.: Symbole des mathematischen Modells

5.1.4.1. Zielfunktion

Die Zielfunktion enthält die gleichgewichteten Kosten bzw. Erlöse der Teilmodelle aus Produktion, Lagerhaltung und Transport, da das Modell die Optimierung aus zentraler Perspektive zur Bestimmung des Potenzials kooperierender Planung beschreibt. Würden nur Rüst-, Bestands- und fixe Lieferkosten minimiert, so entspräche dies der herkömmlichen Planungsweise.

Für Produktionslosgrößenprobleme wird, wie in 3.1.1.1 gezeigt, häufig eine Mehrzieloptimierung mit Bestands-, Rüst- und Produktionskosten sowie gegebenenfalls Verspätungskosten angegeben. Bestandskosten setzen sich aus wertabhängigen, dies sind vor allem die Kapitalbindungskosten, und wertunabhängigen Kosten, z.B. Lagerbetrieb, Personal und Strom, zusammen. Wie bei Losgrößenmodellen allgemein üblich wird lediglich ein produktabhängiger Kostensatz berücksichtigt. Bei Small Bucket-Problemen sind die Rüstkosten und -zeiten im Allgemeinen reihenfolgeabhängig, d.h. durch Scheduling wird eine Produktionsreihenfolge bestimmt, die möglichst kurze Rüstzeiten verursacht. Rüstkosten sind generell schwer zu ermitteln, da sie keine direkten Kosten erzeugen. Sie sind als Opportunitätskosten zu betrachten (vgl. [Tem06, S. 132]), da die Fertigungsressourcen während des Rüstens nicht wertschöpfend eingesetzt werden können. Daher werden die Rüstzeiten

in der Zielfunktion mit einem lieferantenspezifischen Opportunitätskostensatz angeführt. Der Umstand, dass diese Kosten nicht wirksam sind, wenn die Kapazität nicht ausgelastet ist, wird dabei vernachlässigt. Die Produktionskosten zeitabhängig zu definieren ist dann sinnvoll, wenn beispielsweise die Personalkosten in einigen Perioden (Wochenende, Nachtschicht) teurer sind. Dieser Umstand wird im Folgenden nicht berücksichtigt und die Produktionskosten damit, da sie konstant sind, nicht in die Zielfunktion übernommen. Verspätungskosten werden ebenso nicht berücksichtigt, da der Minimallagerbestand zu jeder Zeit eingehalten werden muss.

$$\begin{aligned}
\text{minimize } \rightarrow & \sum_{p1}^P \sum_{p2}^P \sum_z^Z \sum_t^T r f_{p1,p2,z,t} \cdot RZ_{p1,p2} \cdot OK_z \\
& + \sum_p^P \sum_z^Z \sum_t^T i l_{p,z,t} \cdot LK_p) \\
& + \sum_p^P \sum_t^T i a_{p,t} \cdot LK_p \\
& + \sum_i^N \sum_j^N \sum_l^L \sum_{mt}^{MT} C_{i,j} \cdot (KK + EK) \cdot x_{i,j,l,mt} \\
& + \sum_l^L \sum_{mt}^{MT} (w_{Abnehmer,l,mt} - w_{Depot,l,mt}) \cdot FR \\
& + \sum_l^L \sum_{mt}^{MT} FZ \cdot \sum_j^Z x_{Depot,j,l,mt} \\
& + \sum_{l1}^L \sum_{l2}^L \sum_{mt}^{MT} l_{s_{l1,l2,mt}} \cdot LS \\
& - \sum_l^L \sum_{mt}^{MT} a a_{l,mt} \cdot AW
\end{aligned} \tag{5.1}$$

Bei der Bestimmung der Zielfunktion für den Teilbereich Transport kann auf die Klassifizierung von Domschke aus 3.1.3.4 zurückgegriffen werden. Die hier genannten Ziele können dem Anspruch dieser Arbeit jedoch nicht genügen, da das Maß für die variablen Kosten eines Fahrzeugs an die Entfernung gebunden ist. Die kürzere zweier Strecken muss jedoch nicht zwingend die günstigere oder schnellere sein. Im Sinne ökonomisch und ökologisch ausgerichteter Optimierung bietet sich der Durchschnittsverbrauch auf einer

Strecke als Maß an, das sowohl mit den Fahrtkosten als auch mit den erzeugten Emissionen korreliert und mit Parametern für Treibstoff- und Emissionskosten die tatsächlichen streckenabhängigen Kosten ergibt. Hinzu kommen zeitabhängige Kosten für den Fahrer sowie fixe Fahrzeugeinsatzkosten. Da mit dem integrierten Modell eine Optimierung der Supply Chain als Ganzes bezweckt wird, wird kein abgestuftes Tarifmodell benutzt, das als Treppenfunktion nicht die tatsächliche Kostenstruktur des Spediteurs widerspiegeln würde. Die weiteren aus dem Zielsystem resultierenden Anforderungen werden durch die Klassifikation nicht abgedeckt. Dies sind Strafkosten für Standzeiten bei der Entladung und Erlöse durch Anschlussaufträge. Während die Strafkosten exakt ermittelt werden können, können die Anschlussaufträge lediglich abstrahiert berücksichtigt werden, um ein „Weltmodell“ zu vermeiden. Ein Anschlussauftrag soll dann für ein Fahrzeug als akquiriert gelten, falls die Tour vor einem bestimmten Zeitpunkt beendet wurde. Auf diese Weise wird vermieden auch externe Transportaufträge im Szenario generieren zu müssen.

Die erste Zeile der in 5.1 dargestellten Zielfunktion summiert die durch Umrüsten verlorene Zeit bei allen Lieferanten auf und multipliziert sie mit dem jeweils geltenden Opportunitätskostensatz. In der zweiten und dritten Zeile werden die Kosten der Bestände bei den Lieferanten bzw. im LLZ summiert. Die Lagerhaltungskosten werden als für beide Stufen gleich angesehen, was dadurch zu rechtfertigen ist, dass zwischen den Lagern keine weitere Wertschöpfung stattfindet. In den Zeilen vier bis sechs werden die Kosten für den Transport bestimmt. Zeile vier enthält die Kosten für Kraftstoff und Emissionen, Zeile fünf die für die Arbeitszeit des Fahrers und Zeile sechs die Fixkosten für den Fahrzeugeinsatz. In Zeile sieben werden Strafkosten für zeitgleich eintreffende LKW addiert. Zuletzt wird in Zeile acht der Wert eines Anschlussauftrags subtrahiert, wenn ein solcher durch das frühe Eintreffen eines Fahrzeugs beim Abnehmer möglich ist. Damit sind die in 2.1.1 bis 2.1.3 geforderten Zielsysteme der Beteiligten abgebildet. Die Ziele des Abnehmers sind implizit durch den vereinbarten Mindestbestand und die auf ökonomische und ökologische Effizienz abzielende Optimierung berücksichtigt.

5.1.4.2. Produktion

Da die Produktion der Lieferanten über jeweils nur eine Fertigungsressource abgebildet wird, kann eines der einstufigen Small Bucket-Standardlosgrößenprobleme als Basis gewählt werden. Das DLSP wird auf Grund von zwei Nachteilen verworfen. Zum einen sind durch die alles-oder-nichts-Annahme hinsichtlich der Produktion in einer Periode

nicht beliebige Losgrößen möglich, was die Möglichkeiten der Belieferungsmengenplanung einschränkt. Die Grundannahme dieser Arbeit ist, dass sich durch Änderungen der Liefermengen bessere Transporte umsetzen lassen. Die Vorteile müssten beim DLSP mit abnehmernaher Lagerhaltung erkaufte werden. Zum anderen verliert das DLSP den Rüstzustand über ungenutzte Perioden. Dies führt an der Grenze zweier Makroperioden zu Mehrkosten, da nicht sichergestellt ist, dass die Kapazität jeder Periode vollständig genutzt wird. Beim CSLP treten diese Einschränkungen nicht auf. Dies gilt ebenso für das PLSP, dessen noch exaktere Planung nicht auf die Tourenplanung übertragen werden kann, sodass dieses noch komplexere Modell hinsichtlich der Kopplung keinen weiteren Vorteil erzielen könnte.

Die zuvor in der Klassifikation angesprochene Diskrepanz zwischen den Periodenlängen der Teilmodelle wird dadurch gelöst, dass die vom GLSP (vgl. 3.1.1.5) bekannte Zuordnung von Mikro- zu Makroperioden übernommen wird. Auf diese Weise kann die Makroperiodenlänge der Produktion an die Periodenlänge des VRP, üblicherweise ein Tag, angeglichen werden, während über die Mikroperioden Produktions- und Rüstreihenfolgen abgebildet werden. Eine Kopplung der Modelle ist somit möglich. Auf die Produktionsplanung hat sie zunächst keine Auswirkung; sie kann fortlaufend in Mikroperioden erfolgen, die Makroperiodenübergänge sind an dieser Stelle nicht relevant. Ein wichtiger Unterschied besteht jedoch darin, dass die Mikroperioden im vorliegenden Modell im Gegensatz zum GLSP eine fixe Länge aufweisen. Der Grund ist die gewünschte Abbildungsgenauigkeit bezüglich der Zeit. Da der Lagerab- und zugang untertäglich dargestellt werden soll, muss der Zeitpunkt aus den verstrichenen Mikroperioden geschlussfolgert werden können. Bei variabler Mikroperiodenlänge ist der Lagerbestand nur zu Beginn einer Makroperiode definiert, sodass die Festlegung der Zeitfenster für den Transport wesentlich aufwendiger wäre. Daraus folgt die zweite Herausforderung, die exakte zeitliche Darstellung der Rüstvorgänge. Dazu finden sich wenige Beispiele in der Literatur², die aber allesamt auf dem DLSP beruhen und damit nicht die hier gestellten Anforderungen erfüllen. Aus diesem Grund wurde ein neuartiges CSLP- und GLSP-basiertes Losgrößenmodell entworfen, das die geforderten Eigenschaften aufweist und vor allem beliebige Vielfache der Periodenlänge als Rüstzeit zulässt. In Analogie zum DLSPSD (DLSP with Sequence Dependencies) mag es als CSLPSD bezeichnet werden.

²Das Losgrößen- und Schedulingproblem mit reihenfolgeabhängigen Rüstkosten und periodenübergreifenden Rüstzeiten hat relativ wenig Beachtung gefunden, es finden sich Modelle bei Salomon et al. [SSW⁺97], das von Jordan und Drexel [JD98] aufgegriffen wird, und bei Brodkorb und Dangelmaier [BD09].

Das Modell ist grundsätzlich ein um eine Dimension erweitertes CSLP; es besitzt zusätzlich einen Index für den Lieferanten. Da nun mehrere Lieferanten über ein Modell abgebildet werden, ist zusätzlich eine Einschränkung bezüglich der fertigmachbaren Produkte zu treffen, um beispielsweise die Forderung nach Single Sourcing erfüllen zu können. Die umfangreichste Erweiterung liegt jedoch für die Integration mehrperiodischer Rüstzeiten vor. Dazu wird ein so genannter Rüstzähler eingeführt, der mit fortschreitender Zeit jeweils um eins verringert wird. Negative Werte und Null zeigen Produktionsbereitschaft an, positive Werte stehen für die Restlaufzeit eines laufenden Rüstvorgangs. Die Addition einer Rüstzeit $ra = RZ_{p1,p2} + rz \cdot (-1)$ geschieht in jeder Periode, falls ein Rüstwechsel (d.h. $\exists p1, p2 : ri_{p1,p2} = 1$) vorliegt, ansonsten nicht:

$$ra = \begin{cases} RZ_{p1,p2} + rz \cdot (-1) & \text{wenn } ri_{p1,p2} = 1 \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

Dabei steht $RZ_{p1,p2}$ für die Rüstzeit von Produkt p1 auf Produkt p2 und $rz \cdot (-1)$ für den aktuellen Stand des Rüstzählers, der zusätzlich auf Null zurückgesetzt werden muss. Die einfachste Beschreibung wäre $ra = (RZ_{p1,p2} + rz \cdot (-1)) \cdot (ri_{p1,p2})$, sie ist jedoch nicht-linear. Suhl und Mellouli [SM05, S. 103f.] schlagen für eine solche Fallunterscheidung folgende Linearisierung vor:

$$x_1 \leq M_1 y \tag{5.2}$$

$$x_1 - x_2 \leq M_2 (1 - y) \tag{5.3}$$

$$x_2 - x_1 \leq M_3 (1 - y) \tag{5.4}$$

Durch Restriktion 5.2 wird x_1 auf 0 gezwungen, falls $y = 0$. Die Restriktionen 5.3 und 5.4 erzwingen, dass $x_1 = x_2$ im Fall von $y = 1$. M_1 , M_2 und M_3 werden als obere Schranke von x_1 , $x_2 - x_1$ bzw. von $x_1 - x_2$ gewählt. Diese Darstellung wurde übernommen, jedoch auf ein Big M MR beschränkt. Eine Übersicht zum Ablauf eines Rüstvorgangs findet sich in Abbildung 5.1. Nachfolgend finden sich die Restriktionen des Produktionsteilmodells.

$$\sum_p^P q_{z,p,t} \cdot PZ_p \leq K \quad \forall z \in Z, t \in T \tag{5.5}$$

Periode (t)	Makroperiode 1					Makroperiode 2				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Rüstzähler (rz)	-1	-2	-3	5	4	3	2	1	0	-1
Rüstzustand P1 (r[1])	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
Rüstzustand P2 (r[2])	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1
Rüstindikator (ri[1,2])	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
Laufender Rüstvorgang (rl)	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0
Rüstzeitaddition (ra)	0	0	0	8	0	0	0	0	0	0

Abbildung 5.1.: Implementation der reihenfolgeabhängigen Rüstzeit im CSLPSD

$$q_{z,p,t} \geq 0 \quad \forall z \in Z, p \in P, t \in T \quad (5.6)$$

$$q_{z,p,t} \leq r_{z,p,t} \cdot M \quad \forall z \in Z, p \in P, t \in T \quad (5.7)$$

$$\sum_p^P r_{z,p,t} = 1 \quad \forall z \in Z, t \in 0 \cup T \quad (5.8)$$

$$rl_{z,t} \cdot M \geq rz_{z,t} \quad \forall z \in Z, t \in T \quad (5.9)$$

$$q_{z,p,t} \leq (1 - rl_{z,t}) \cdot M \quad \forall z \in Z, p \in P, t \in T \quad (5.10)$$

$$rz_{z,t} = rz_{z,t-1} - 1 + ra_{z,t} \quad \forall z \in Z, t \in T \quad (5.11)$$

$$ra_{z,t} \geq 0 \quad \forall z \in Z, t \in T \quad (5.12)$$

$$ra_{z,t} \leq MR \sum_{p1}^P \sum_{p2}^P ri_{z,p1,p2,t} \quad \forall z \in Z, t \in T \quad (5.13)$$

$$ra_{z,t} - (RZ_{p1,p2} + rz_{z,t-1} \cdot (-1)) \leq MR(1 - ri_{z,p1,p2,t}) \quad (5.14)$$

$$\forall z \in Z, p1 \in P, p2 \in P, t \in T$$

$$(RZ_{p1,p2} + rz_{z,t-1} \cdot (-1)) - ra_{z,t} \leq MR(1 - ri_{z,p1,p2,t}) \quad (5.15)$$

$$\forall z \in Z, p1 \in P, p2 \in P, t \in T$$

$$rz_{z,t-1} - ((1 - ri_{z,p1,p2,t})M) \leq ri_{z,p1,p2,t} \quad \forall z \in Z, p1, p2 \in P, t \in T \quad (5.16)$$

$$ri_{z,p1,p2,t} \geq r_{z,p2,t} + r_{z,p1,t-1} - 1 \quad \forall z \in Z, p1, p2 : p1 \neq p2 \in P, t \in T \quad (5.17)$$

$$q_{z,p,t} \leq M \cdot LP_{z,p} \quad \forall z \in Z, p \in P, t \in T \quad (5.18)$$

$$r_{z,p,t}, ri_{z,p1,p2,t}, rl_{z,t} \in \{0, 1\} \quad \forall z \in Z, p, p1, p2 \in P, t \in T, z \in T \quad (5.19)$$

Restriktion 5.5 stellt die Einhaltung der Kapazitätsrestriktion sicher. Restriktion 5.6 beschränkt Losgrößen auf positive Werte. Restriktion 5.7 beschränkt die Produktion auf solche Produkte, für die aktuell gerüstet ist. Restriktion 5.8 fordert einen eindeutigen Rüstzustand. Restriktion 5.9 setzt den Indikator für laufende Rüstvorgänge, rl . Restriktion 5.10 verhindert die Produktion, falls ein Rüstvorgang läuft. Restriktion 5.11 setzt die beschriebene Fortschreibung des Rüstzählers um. Restriktion 5.12 fordert, dass nur positive Rüstzeiten zum Rüstzähler addiert werden dürfen. Restriktionen 5.13 bis 5.15 setzen die Linearisierung der Rüstzeitzuweisung um. Restriktion 5.16 stellt sicher, dass sich Rüstvorgänge nicht überlagern. Restriktion 5.17 zeigt einen Rüstwechsel über die Variable ri an. Über Restriktion 5.18 wird die Zuweisung von Produkten an Lieferanten vorgenommen. Zuletzt stellt Restriktion 5.19 die verwendeten Binärvariablen dar.

5.1.4.3. Lagerhaltung

Die Lagerhaltung findet dem Konzept nach nur an einer Stelle statt, dem LLZ. Diese Forderung lässt sich nicht vollständig umsetzen, da ggfs. Waren gepuffert werden müssen, die erst am nächsten Tag abgeholt werden können. Somit existieren zwei Lagerorte, die über einen Materialfluss verbunden werden müssen. Dies gilt allerdings nur für interne Teile; externe Teile, die an einen anderen als den hier betrachteten Abnehmer gehen, sollen nicht weiter transportiert werden. Der Materialfluss wird über die Variable tp_{i,j,p,l,t_s,t_e} abgebildet, die Auskunft darüber gibt, von welchem Knoten i an welchen Knoten j ein Teil p mittels LKW l transportiert wird. Der Transport beginnt in Mikroperiode t_s und endet in t_e . In 5.1.4.5 wird beschrieben, wie durch dieses Vorgehen eine Kopplung von Produktion und Transport erzielt werden kann. Nachfolgend stehen die Restriktionen zur Lagerhaltung.

$$il_{z,p,0} = 0 \quad \forall z \in Z, p \in P \quad (5.20)$$

$$ia_{p,0} = B_p^{min} \quad \forall z \in Z, p \in P \quad (5.21)$$

$$\begin{aligned} il_{z,p,t} = & il_{z,p,t-1} + q_{z,p,t} - DE_{p,t} \\ & - \sum_j^N \sum_l^L \sum_{t_e}^T tp_{z,j,p,l,t,t_e} \\ & + \sum_i^Z \sum_l^L \sum_{t_s}^T tp_{i,z,p,l,t_s,t} \quad \forall z \in Z, p \in P, t \in T \end{aligned} \quad (5.22)$$

$$ia_{p,t} = ia_{p,t-1} - DI_{p,t} + \sum_z^Z \sum_l^L \sum_{t_s}^T tp_{z,Abnehmer,p,l,t_s,t} \quad \forall p \in P, t \in T \quad (5.23)$$

$$tp_{i,j,p,l,t_s,t_e} \begin{cases} = 0 & \text{wenn } t_e < t_s \\ \geq 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad \forall i, j \in N, p \in P, l \in L, t_s, t_e \in T \quad (5.24)$$

$$tp_{i,j,p,l,t_s,t_e} \begin{cases} \geq 0 & \text{wenn } \exists mt : t_s \in R_{mt} \vee t_e \in R_{mt} \\ = 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad \forall i, j \in N, p \in P, l \in L, t_s, t_e \in T \quad (5.25)$$

$$ia_{p,t} \leq B_p^{max} \quad \forall p \in P, t \in T \quad (5.26)$$

$$ia_{p,t} \geq B_p^{min} \quad \forall p \in P, t \in T \quad (5.27)$$

$$il_{z,p,t} \leq \frac{B_p^{max}}{2} \quad (5.28)$$

Die Restriktionen 5.20 und 5.21 setzen den Initialbestand von abnehmernahen und abnehmerfernen Lager (LLZ) auf Null. Restriktion 5.22 enthält die Lagerbestandsgleichung des abnehmernahen Lagers. Eingehend sind dabei das produzierte Los der Periode und die Materialflüsse von anderen Knoten, d.h. Waren, die der abholende LKW bereits geladen hat. Ausgehend sind die externen Bedarfe DE sowie der ausgehende Materialfluss. Restriktion 5.23 ist entsprechend die Lagerbestandsgleichung für das abnehmernahe Lager. Hier gehen die internen Bedarfe ab und die Materialflüsse der durch die LKW transportierten Produkte ein. Restriktion 5.24 stellt fortschreitende Materialflüsse sicher. Restriktion 5.25 ist für die Kopplung von Produktion und Transport wichtig, denn sie verhindert, dass Materialflüsse über eine Makroperiodengrenze hinaus gehen, was bedeuten würde, dass ein Fahrzeug in einer anderen Periode ankommt als es losgefahren ist. Die Fallunterscheidung greift auf die Menge R zurück, die jeweils die Mikroperioden einer Makroperiode enthält. Nur für solche t_s und t_e ist ein Materialfluss gestattet, die in derselben Menge R liegen. Zuletzt legen die Restriktionen 5.26 bis 5.28 die über einen Parameter bestimmten maximalen und minimalen Bestände für Produkte fest, sowie die maximalen Bestände im abnehmernahen Lager, die pro Produkt auf die Hälfte des maximalen Bestands im abnehmerfernen Lager festgelegt werden.

5.1.4.4. Materialfluss und Fahrzeugeinsatz

Da der Materialfluss die entscheidende Rolle spielt, basiert das Vehicle Routing auf der (Multi) Commodity Flow Formulation. Diese Modellierung findet sich beispielsweise auch bei Fumero und Vercellis [FV99]. Die explizite Abbildung des Materialflusses ist der Modellierung der Produktion bei den Lieferanten und dem Verbrauch des Abnehmers geschuldet. Beides findet in Mikroperioden statt und somit muss auch der Materialfluss feingranuliert sein, um früheste Abhol- und späteste Anlieferzeitpunkte bestimmen zu können. Gleichzeitig muss er fahrzeuggebunden sein, damit die jeweiligen Zeitfenster nur für das Fahrzeug angewandt werden, die das entsprechende Produkt pünktlich liefern müssen. Die bei Vehicle Flow-Formulierungen notwendige Subtour Elimination, die fordert, dass jede nicht-leere Teilmenge von Knoten der Kardinalität n maximal $n-1$ befahrene Kanten enthält, also verhindert, dass sich unverbundene Touren bilden, ist in diesem Falle nicht notwendig, da der Materialfluss die Verbindung sicherstellt³.

$$\sum_p^P \sum_{t_s}^{R_{mt}} \sum_{t_e}^{R_{mt}} tp_{i,j,p,l,t_s,t_e} \cdot G_p \leq K^{KG} \quad \forall i, j \in N, l \in L, mt \in MT \quad (5.29)$$

$$\sum_p^P \sum_{t_s}^{R_{mt}} \sum_{t_e}^{R_{mt}} tp_{i,j,p,l,t_s,t_e} \cdot V_p \leq K^{M3} \quad \forall i, j \in N, l \in L, mt \in MT \quad (5.30)$$

$$\sum_j^N x_{Depot,j,l,mt} = 1 \quad \forall l \in L, mt \in MT \quad (5.31)$$

$$\sum_i^N x_{i,z,l,mt} - \sum_i^N x_{z,i,l,mt} = 0 \quad \forall z \in Z, l \in L, mt \in MT \quad (5.32)$$

$$\sum_i^{Depot \cup Z} x_{i,Abnehmer,l,mt} = 1 \quad \forall l \in L, mt \in MT \quad (5.33)$$

$$w_{i,l,mt} + ST_i + F_{i,j} - w_{j,l,mt} \leq (1 - x_{i,j,l,mt}) \cdot M \quad \forall i, j \in N, l \in L, mt \in MT \quad (5.34)$$

³„Because equations [...] for demand fulfillment have been introduced, typical subtour elimination constraints are unnecessary in this case.“ [FV99, S. 333], vgl. auch [LSG05]

$$E \geq w_{i,l,mt} \quad \forall i \in \{Depot, Abnehmer\}, l \in L, mt \in MT \quad (5.35)$$

$$S \leq w_{i,l,mt} \quad \forall i \in \{Depot, Abnehmer\}, l \in L, mt \in MT \quad (5.36)$$

$$AZ \cdot aaz_{l,mt} \geq w_{Abnehmer,l,mt} - (1 - aaz_{l,mt})M \quad \forall l \in L, mt \in MT \quad (5.37)$$

$$aae_{l,mt} \leq \sum_j^Z x_{Depot,j,l,mt} \quad \forall l \in L, mt \in MT \quad (5.38)$$

$$2 \cdot aa_{l,mt} \leq aaz_{l,mt} + aae_{l,mt} \quad \forall l \in L, mt \in MT \quad (5.39)$$

$$a_{l1,l2,mt} = |w_{Abnehmer,l1,mt} - w_{Abnehmer,l2,mt}| \quad \forall l1, l2 \in L, mt \in MT \quad (5.40)$$

$$a_{l1,l2,mt} + ls_{l1,l2,mt} \geq ST_{Abnehmer} \quad \forall l1, l2 \in L : l1 > l2, mt \in MT \quad (5.41)$$

Die Restriktionen 5.29 und 5.30 sorgen dafür, dass die Kapazitätsrestriktionen des LKW hinsichtlich Gewicht und Volumen nicht überschritten werden. Restriktion 5.31 erzwingt, dass jeder LKW in jeder Periode das Depot verlässt. Restriktion 5.32 stellt sicher, dass jeder Knoten sooft angefahren wie verlassen wird. Restriktion 5.33 sorgt für das Eintreffen des LKW am Abnehmerort. Restriktion 5.34 stellt sicher, dass zwischen den Ankunftszeitpunkten an zwei Knoten mindestens die Summe aus Servicezeit und Fahrzeit verstrichen ist. Die Restriktionen 5.35 und 5.36 legen den frühesten Startzeitpunkt am Depot und den spätesten Eintreffzeitpunkt beim Abnehmer fest. Über die Restriktionen 5.37 bis 5.39 wird das Erreichen eines Anschlussauftrags wie in der Zielfunktion gefordert ermittelt. Dabei wird zunächst festgestellt, ob der Ankunftszeitpunkt beim Abnehmer vor der Deadline für Anschlussaufträge AZ liegt. Anschließend gilt es über Restriktion 5.38 festzustellen, ob das betreffende Fahrzeug tatsächlich im Einsatz war. Dies ist wichtig, da nicht benutzte Fahrzeuge in der gewählten Formulierung trotzdem die Strecke zwischen Depot und

Abnehmer zurücklegen. Zuletzt wird über Restriktion 5.39 das Erreichen des Anschlussauftrags signalisiert, wenn beide Bedingungen erfüllt sind. Die Restriktionen 5.40 bis 5.41 erfüllen die Forderung danach, dass die Fahrzeuge möglichst nicht gleichzeitig beim Abnehmer eintreffen sollen, um Verzögerungen und somit lange Standzeiten zu vermeiden. Dazu wird über die erste Gleichung der zeitliche Abstand zwischen zwei Fahrzeugen festgestellt. Die Absolutfunktion ist im OPL-Modell linearisiert. Zuletzt wird die Länge der gleichzeitigen Anwesenheit der Fahrzeuge festgestellt, die Strafminuten ls erzeugt, sobald sie die normale Servicezeit des Abnehmers überschreitet. Die Restriktionen zur Verbindung mit Anschlussaufträgen beziehen sich auf Punkt 3 der Ziele des Spediteurs (vgl. 2.1.3) und belohnen ein frühzeitiges Abschließen des Auftrags. Die Standzeiten wurden in Punkt 4 aufgeführt.

5.1.4.5. Verknüpfung

Da im vorliegenden Modell ein Materialfluss nur durch ein Fahrzeug stattfinden kann, müssen dessen Bewegungen dem Materialfluss folgen. Dieser Zusammenhang wurde bereits von Magnanti [Mag81] beschrieben und ist in der Folge Basis für viele Commodity Flow-Formulierungen gewesen. Des Weiteren müssen die Zeitfenster aus dem Produktionsmodell abgeleitet werden.

$$\sum_p^P \sum_{t_s}^{R_{mt}} \sum_{t_e}^{R_{mt}} tp_{i,j,p,l,t_s,t_e} \leq \begin{cases} x_{i,j,l,mt} \cdot M & \text{wenn } t_s \in R_{mt} \\ M & \text{sonst} \end{cases} \quad \forall i \in Z, j \in N \setminus \{Depot\}, l \in L, mt \in MT \quad (5.42)$$

$$tp_{z,j,p,l,t,t_e} \leq M(1 - r_{z,p,t}) \quad \forall z \in Z, j \in N, p \in P, l \in L, t, t_e \in T \quad (5.43)$$

$$wil_{z,l,mt,t} \cdot M \geq \sum_j^N \sum_p^P \sum_{t_e}^{R_{mt}} tp_{z,j,p,l,t,t_e} \quad \forall z \in Z, l \in L, mt \in MT, t \in R_{mt} \quad (5.44)$$

$$wia_{l,mt,t} \cdot M \geq \sum_i^N \sum_p^P \sum_{t_s}^{R_{mt}} tp_{i,Abnehmer,p,l,t_s,t} \quad \forall l \in L, mt \in MT, t \in R_{mt} \quad (5.45)$$

$$w_{z,l,mt} \geq ((wil_{z,l,mt,t} \cdot t) \bmod PL) \cdot TL \quad (5.46)$$

$$\forall z \in Z, l \in L, mt \in MT, t \in R_{mt}$$

$$w_{Abnehmer,l,mt} \leq ((wia_{l,mt,t} \cdot t) \bmod PL) \cdot TL + M \cdot (1 - wia_{l,mt,t}) \quad (5.47)$$

$$\forall l \in L, mt \in MT, t \in R_{mt}$$

Restriktion 5.42 bindet die Fahrzeugbewegung an den Materialfluss, d.h. wenn Teile zwischen zwei Knoten bewegt werden, dann muss sich parallel dazu das entsprechende Fahrzeug bewegen. Eine Menge größer Null im Materialfluss zwingt daher die Binärvariable x des Vehicle Routing-Problems auf 1, d.h. eine Fahrzeugbewegung findet statt. Die Fallunterscheidung ist wiederum auf Grund der unterschiedlich granulierten Zeitperioden notwendig. Ohne diese würde ein Materialfluss zwischen zwei Knoten zu einem beliebigen Zeitpunkt Fahrzeugbewegungen zwischen diesen Knoten in jeder Makroperiode bewirken. Restriktion 5.43 erfüllt die Forderung nach geschlossener Produktion, d.h. ein Produkt kann nur abgeholt werden, wenn bei dem entsprechenden Lieferanten nicht mehr hierfür gerüstet ist. Restriktion 5.45 zwingt die Indikatorvariable wia auf eins, falls in der entsprechenden Mikro- und Makroperiode eine Warenanlieferung durch den zugehörigen LKW erfolgt, und signalisiert so, dass ein Zeitfenster eingehalten werden muss. Dieses wird durch Restriktion 5.47 gesetzt. Der Anfahrzeitpunkt muss kleiner gleich dem Ankunftszeitpunkt des Materialflusses sein, was durch Multiplikation des Indikators mit der Mikroperiode geschieht. Da Mikroperioden auch über Makroperioden fortlaufend sind, muss durch modulo PL , d.h. Mikroperioden pro Makroperiode, die Position der Mikroperiode t innerhalb der Makroperiode mt bestimmt werden. Zuletzt wird diese mit TL , also den Minuten pro Makroperiode, multipliziert, da Abholzeitfenster durch Minuten und Losproduktion durch Mikroperioden bestimmt sind. Die Addition von $M \cdot (1 - wia_{l,mt,t})$ ist erforderlich, da das Zeitfenster sonst durch Mikroperioden ohne Anlieferung auf ≤ 0 gezwungen würde. Ist jedoch der späteste Ankunftszeitpunkt kleiner Null, so ist keine Fahrzeugbewegung möglich, also auch nicht die für ungenutzte Fahrzeug von Knoten 0

(Depot) zu N (Abnehmer), daher ist der Anlieferzeitpunkt für Mikroperioden ohne Anlieferung gleich M, und folglich ausreichend groß. Für den Anlieferzeitpunkt ist sichergestellt, dass er kleiner ist als der früheste tatsächliche Bedarfstermin. Diese Formulierung ist durch den Gebrauch der Modulo-Operation nicht-linear und wurde entsprechend für das Lösen mittels linearer Optimierung umformuliert (vgl. A.1). Entsprechendes gilt für die jeweiligen Abholzeitfenster und die Restriktionen 5.44 und 5.46.

5.1.4.6. Fazit

Das vorliegende Modell bildet erstmalig den Fall Produktion-Lagerhaltung-Distribution-Lagerhaltung (vgl. 3.1.4.1.5) für mehrere Produzenten und einen Abnehmer inklusive Routing ab. Durch die erfolgte Kopplung eines Small Bucket-Losgrößenmodells an das Vehicle Routing liegt darüber hinaus eine Möglichkeit zur Optimierung von Just-in-Time-Produktion in Verbindung mit Sammelverkehren vor und würde also auch für die in 3.2.1.1 beschriebenen Belieferungsverfahren angewandt werden können. Es wurde besonders Wert darauf gelegt, die identifizierten Ziele der Beteiligten mit einzubeziehen. Durch unterschiedliche Zielfunktionen können weitere Analysen vorgenommen werden, die die Planung bei lagerloser Belieferung oder bei ausschließlicher Transportoptimierung untersuchen. Nicht zuletzt kann das Modell, ggfs. mit geringfügigen Anpassungen, auch für die innerbetriebliche mehrstufige Planung genutzt werden, falls die innerbetrieblichen Transportzeiten eine relevante Größe besitzen.

5.2. Herleitung des Verfahrens zur Abschätzung des theoretischen Optimums

Eine Heuristik ist nach Reeves „a technique which seeks good (i.e. near-optimal) solutions at a reasonable computational cost without being able to guarantee either feasibility or optimality, or even in many cases to state how close to optimality a particular feasible solution is“ [Ree95, S. 6]. Da das Gesamtproblem eine zu hohe Komplexität aufweist, um es optimal zu lösen (vgl. Tabelle 6.1), wird es entsprechend der in 2.2.1 und 2.2.2 gezeigten über- und innerperiodischen Abhängigkeiten zwischen Produktion und Transport zerlegt. Dabei tritt ein Genauigkeitsverlust ein, der sowohl Sukzessiv- als auch integrierte Planung

betrifft und daher hingenommen wird. So wird, um die rechtzeitige Anlieferung sicherzustellen, ein Zeitfenster für Transporte definiert, welches im integrierten Modell, das in 5.1.4 vorgestellt wird, nicht notwendig ist, da die Anlieferung hier jederzeit Just-in-Time erfolgen kann. Es soll erwähnt sein, dass diese Genauigkeit in der Praxis bei der Anlieferung lagerhaltiger Teile durch Sammeltouren ohnehin nicht erreicht wird. Der wichtigere Bestandteil der minutengenauen Abholung wird beibehalten.

In beiden Fällen wird angenommen, dass alle Lieferanten im 24-Stunden-Betrieb arbeiten. Die Modelle sind aber allgemein gültig, da der tägliche Startzeitpunkt und die verfügbare Kapazität in Minuten variabel sind.

5.2.1. Sukzessive Lösung

Die sukzessive Lösung stellt den Ist-Zustand dar, in dem zunächst die Produktion und darauf aufbauend der Transport geplant wird. Sie wird für den Vergleich mit der integrierten Lösung benötigt. Auch wenn für dieses Verfahren Produktion und Transport nicht gemeinsam in einem Modell vorkommen und die Komplexität allein dadurch reduziert wird, so ist das CSLPSD für die Anzahl Mikroperioden, die für eine exakte Planung der Transporte benötigt werden, rechnerisch noch zu anspruchsvoll, als dass es in akzeptabler Zeit, ggfs. auch durch Inkaufnahme eines gewissen Gaps⁴, zu lösen wäre. Hinzu kommt der enorme Speicherbedarf. Daher wird auch die sukzessive Produktionsplanung in einen überperiodischen und einen innerperiodischen Teil aufgespalten.

5.2.1.1. Überperiodisch

Das überperiodische Modell legt die zu produzierenden Mengen in jeder Periode fest, ohne eine Aussage über die Produktionsreihenfolge zu treffen. Es liegt also eine herkömmliche Big Bucket-Planung vor. Demzufolge wird auch das CLSP (vgl. 3.1.1.5) als Basis gewählt, allerdings muss es in Hinblick auf die sich anschließende Transportplanung angepasst werden. Weiterhin bedarf die Bestimmung der Rüstzeiten genauerer Beachtung.

Da für die Lieferanten eine ganztägige Produktion angenommen wird, der Transport sich aber nicht über zwei Makroperioden erstrecken soll, muss es einen Zeitpunkt geben, bis

⁴Der Gap bezeichnet den Abstand der gefundenen zulässigen Lösung eines MIP-Problems zur optimalen Lösung der LP-Relaxation.

zu dem eine Abholung und die sich anschließende Anlieferung ohne Eil-/Sondertransporte garantiert wird. Aus diesem Grund werden für die überperiodische Planung die Makroperioden für Bedarf und Produktion gegeneinander verschoben (vgl. Abb. 5.2). Das Zeitfenster für Transporte folgt aus der Beschränkung auf innerperiodische Transporte und die gesetzliche Begrenzung der Lenkzeit auf neun Stunden pro Tag⁵. Teile, die nach dem Grenzzeitpunkt gefertigt werden, werden innerhalb der Transportperiode des nächsten Tages abgeholt. Auf diese Weise kann Planungssicherheit hergestellt und das Unterschreiten des Mindestbestandes vermieden werden, ohne die Transportplanung mit einzubeziehen. Aus dem gleichen Grund wird bei der Sequenzierung der Startzeitpunkt der Produktion in die Vergangenheit gelegt, um die Verschiebung zu berücksichtigen, denn die Produktionsperiode liegt zeitlich vor der Bedarfsperiode.

Planungsperiode	1		2		3	
Zeit	15.00 - 0.00	0.00 – 15.00	15.00 - 0.00	0.00 – 15.00	15.00 - 0.00	0.00 – 15.00
Bedarfsperiode	1		2		3	
Transport	8.00 – 17.00		8.00 – 17.00		8.00 – 17.00	

Abbildung 5.2.: Big Bucket-Planung und Abholzeitfenster

Da auf dieser Planungsebene keine Produktionsreihenfolge festgelegt wird, müssen die Rüstzeiten, die nur reihenfolgebezogen hinterlegt sind, geschätzt werden. Die Berücksichtigung ist notwendig, um die Kapazität der Periode bei der anschließenden Feinplanung nicht zu überschreiten. Die für ein Teil angenommene durchschnittliche Rüstzeit ist auf alle Teile eines Lieferanten bezogen und nicht nur auf solche, die innerhalb einer Periode zusammen produziert werden, was exakter wäre. Eine Darstellung, die die durchschnittliche Rüstzeit bezogen auf die in der Periode gefertigten Teile errechnet, ist nicht linear, da dieser Wert das Verhältnis zweier Entscheidungsvariablen (Summe der Rüstzeiten gefertigter Teile und Anzahl gefertigter Teile) darstellt.

Nachfolgend findet sich die Formalisierung des CLSP-T genannten Modells, die OPL-Version findet sich in Anhang A.2. Die Symbole sind in Tabelle 5.2 zu finden. Es werden im Weiteren nur die Symbole aufgeführt, die bislang nicht erläutert wurden oder die im vorliegenden Modell anders benutzt werden.

⁵Nach FPersV §1(1) bzw. Verordnung (EG) 561/2006 Artikel 6 (1); weitergehende Vorschriften wurden abstrahiert, vgl. auch [Sch94, S. 58].

$$\text{minimize} \rightarrow \sum_p^P \sum_t^T RZ_p \cdot ri_{p,t} + LK_p \cdot i_{p,t} \quad (5.48)$$

$$i_{p,t} = i_{p,t-1} + q_{p,t} - D_{p,t} \quad \forall p \in P, t \in T \quad (5.49)$$

$$i_{p,0} = B_p^{\min} \quad \forall p \in P \quad (5.50)$$

$$i_{p,t} \geq B_p^{\min} \quad \forall p \in P, t \in T \quad (5.51)$$

$$i_{p,t} \leq B_p^{\max} \quad \forall p \in P, t \in T \quad (5.52)$$

$$q_{p,t} \leq M \cdot ri_{p,t} \quad \forall p \in P, t \in T \quad (5.53)$$

$$\sum_p^P PZ_p \cdot q_{p,t} + RZ_p \cdot ri_{p,t} \leq K \quad t \in T \quad (5.54)$$

$$q_{1,t} \cdot V \leq Kap^{M3} \quad \forall t \in T \quad (5.55)$$

$$q_{1,t} \cdot G \leq Kap^{KG} \quad \forall t \in T \quad (5.56)$$

Die Zielfunktion minimiert die Summe aus Rüst- und Lagerhaltungskosten.

Restriktion 5.49 ist die Lagerbestandsgleichung. Restriktion 5.50 setzt den Anfangsbestand. Die Restriktionen 5.51 und 5.52 sorgen für die Einhaltung der Mindest- und Maximalbestände. Restriktion 5.53 setzt den Rüstindikator. Restriktion 5.54 sorgt für die Einhaltung der Kapazität. Die Restriktionen 5.55 und 5.56 stellen sicher, dass keine Lose produziert werden, die die Kapazität eines LKW in Bezug auf Volumen oder Gewicht überschreiten.

Symbol	Bedeutung
$D_{p,t}$	Bedarf an Teil p in Periode t
RZ_p	reihenfolgeunabhängige Rüstzeit für Teil p
$i_{p,t}$	Lagerbestand für Teil p im LLZ in Periode t
$q_{p,t}$	Losgröße für Teil p in Periode t
$ri_{p,t}$	Rüstindikator für Teil p in Periode t

Tabelle 5.2.: Zusätzliche/geänderte Symbole des CLSP-T

5.2.1.2. Innerperiodisch

Innerhalb einer Periode erfolgt die Feinplanung in zwei Schritten. Zunächst wird die Produktionsreihenfolge bestimmt, aus der die Fertigstellungstermine abgeleitet werden können. Anschließend erfolgt die Transportplanung. Danach liegen vollständige Produktions- und Transportpläne vor.

5.2.1.2.1. Produktion

Da die innerhalb einer Periode zu fertigenden Teile samt ihrer Mengen bekannt sind, ist nun lediglich die optimale Produktionsreihenfolge unter Beachtung der reihenfolgeabhängigen Rüstkosten zu bestimmen. Folglich wird kein Losgrößenmodell benötigt, da die Losgrößen bereits feststehen. Stattdessen wird ein Sequencing-Modell genutzt, das lediglich die beste Reihenfolge für die feststehenden Lose bestimmt.

Es ist zu beachten, dass, wie zuvor beschrieben, die Makroperiode in zwei Abschnitte geteilt wird. Bei der innerperiodischen Planung kann diese Trennung wieder aufgehoben werden, um einen Kapazitätsverlust zu vermeiden. Es ist dabei lediglich zu beachten, dass der Startzeitpunkt der Planungsperiode vor dem Beginn der Bedarfsperiode liegt. Daher ist es, um die Übertragung der Fertigstellungszeitpunkte auf die Transportzeitfenster zu gewährleisten, notwendig, die fortgeschriebene Zeit so beginnen zu lassen, dass sie zu Beginn der Bedarfsperiode den Wert 0 annimmt.

Da das Modell keine Losgrößen bestimmt, sondern diese aus der vorhergehenden Phase bekannt sind, findet es lediglich die optimale Produktionsreihenfolge gemessen allein an den entstehenden Rüstzeiten. Dafür wird eine Menge von Aktivitäten definiert innerhalb derer ein Los produziert werden kann. Die Anzahl von Aktivitäten ist gleich der Anzahl zu fertigender Lose. Insbesondere hat eine Aktivität keine festgelegte zeitliche Dauer, sodass

unterschiedliche Aktivitäten unterschiedlich viel Zeit in Anspruch nehmen können. Jede Aktivität wird bei der Lösung mit genau einem Los belegt, sodass jedes Los verplant und die Reihenfolge determiniert ist. Da die Planung periodenweise abläuft, muss der zuletzt gültige Rüstzustand an die Planung der nachfolgenden Periode weitergegeben werden, um unnötiges Rüsten zu vermeiden bzw. korrekte Rüstzeiten abzubilden. Nachfolgend ist das mathematische Modell des Lotschedulings beschrieben; die Darstellung als OPL-Modell findet sich in Anhang A.3.

Symbol	Bedeutung
A	Menge der Aktivitäten
IR	Initialer Rüstzustand
$LP_{z,p}$	Zurordnung des Teils p zum Lieferanten z
P	Produktionslose
PZ_p	Produktionszeit von Los p
$RZ_{p1,p2}$	Rüstzeit von Produkt $p1$ auf $p2$
SZ	Startzeitpunkt
Z	Menge der Lieferanten
$r_{z,p,a}$	Rüstindikator bei Lieferant z für Produkt p in Aktivität a
$ri_{z,p1,p2,a}$	Umrüstindikator bei Lieferant z von Produkt $p1$ auf $p2$ für Aktivität a

Tabelle 5.3.: Zusätzliche/geänderte Symbole des Lot Scheduling

$$\text{minimize} \rightarrow \sum_{p1}^P \sum_{p2}^P \sum_a^A ri_{p1,p2,a} \cdot RZ_{p1,p2} \quad (5.57)$$

$$\sum_p^P PZ_p + \sum_{p1}^P \sum_{p2}^P \sum_a^A ri_{p1,p2,a} \cdot RZ_{p1,p2} \leq K \quad (5.58)$$

$$t_0 = SZ \quad (5.59)$$

$$r_{0,0} = 1 \quad (5.60)$$

$$\sum_p^P r_{p,a} = 1 \quad \forall a \in A \quad (5.61)$$

$$\sum_a^A r_{a,p} = 1 \quad \forall p \in P \quad (5.62)$$

$$ri_{p1,p2,a} \geq r_{p2,a} + r_{p1,a-1} - 1 \quad \forall p1, p2 : p1 \neq p2 \in P, a \in A \quad (5.63)$$

$$\sum_p^P ri_{p,0,a} = 0 \quad \forall a \in A : a \geq 2 \quad (5.64)$$

$$t_a = t_{a-1} + \sum_{p1}^P \sum_{p2}^P ri_{p1,p2,a} \cdot RZ_{p1,p2} + \sum_p^P r_{a,p} \cdot PZ_p \quad \forall a \in A \quad (5.65)$$

$$fs_p \geq t_a - M \cdot (1 - r_{a,p}) \quad \forall p \in P, a \in A \quad (5.66)$$

Die Zielfunktion orientiert sich lediglich an den anfallenden Rüstzeiten, die parallel zu den Rüstkosten verlaufen. Restriktion 5.58 stellt die Einhaltung der Kapazität durch den Bedarf an Produktions- und Rüstzeit sicher. Da die Rüstzeiten bei der periodenweisen Planung lediglich geschätzt wurden, könnte es vorkommen, dass der Kapazitätsbedarf unterschätzt wurde. Restriktion 5.59 legt den Startzeitpunkt für den Zeitzähler auf den Startzeitpunkt SZ fest. In dieser Arbeit wird dafür der Wert -540 verwendet. Dies entspricht dem Vorziehen der Produktionsperiode um 540 Minuten gegenüber der Bedarfsperiode und entspricht der zeitlichen Aufteilung, wie sie in 5.2.1.1 vorgestellt wurde. Restriktion 5.60 setzt den Rüstzustand zu Beginn auf das Teil 0 fest. Wie im Anschluss im Algorithmus gezeigt wird entspricht Teil 0 dem initialen Rüstzustand, der stellvertretend für das in der vorherigen Periode zuletzt gefertigte Teil steht. Restriktion 5.61 bewirkt, dass jede Aktivität nur mit einem Los belegt werden kann. Restriktion 5.62 hingegen sorgt dafür, dass jedes geplante Los sequenziert wird. Über Restriktion 5.63 wird der Rüstindikator ri gesetzt. Restriktion 5.64 ist notwendig, um zu verhindern, dass in den Initialzustand zurückgewechselt wird. Restriktion 5.65 schreibt die verstrichene Zeit nach Durchführung von Aktivitäten fort. Dazu werden Rüst- und Produktionszeiten auf die bereits vergangene Zeit addiert. Letztendlich können damit über Restriktion 5.66 die Fertigstellungszeitpunkte der einzelnen Lose bestimmt werden, die im Falle eines internen Teils den frühesten Abholzeitpunkt darstellen. Der Fertigstellungszeitpunkt eines Teils

ist größer-gleich dem Zeitpunkt, zu dem die Produktion dieses Teils, angezeigt über den Rüstzustand r abgeschlossen wurde.

5.2.1.2.2. Transport

Als letzter Schritt erfolgt die Transportplanung, die den optimalen Transportplan aufbauend auf den Produktionsplänen und den dadurch bestimmten Abholzeitpunkten errechnet. Hierfür kann ein VRPTW genutzt werden, dessen Zielfunktion auf die vorgestellten Kosten und Erlöse erweitert wird. Vor der Optimierung ist nicht bekannt, wie viele Fahrzeuge benötigt werden. Da jedoch die Anzahl der verfügbaren Fahrzeuge den Lösungsraum stark vergrößert und sich entsprechend auf die Laufzeit auswirkt, wird die Anzahl schrittweise erhöht, bis eine gültige Lösung gefunden werden kann. Das entsprechende OPL-Modell findet sich in Anhang A.5.

$$\begin{aligned}
\text{minimize} \rightarrow & \sum_l^L \sum_i^N \sum_j^N C_{i,j} \cdot (KK + EK) \cdot x_{i,j,l} \\
& + \sum_l^L (w_{Abnehmer,l} - w_{Depot,l}) \cdot \frac{FR}{60} \\
& + \sum_l^L (FZ \cdot \sum_j^Z x_{Depot,j,l}) \\
& + \sum_{l1}^L \sum_{l2}^L ls_{l1,l2} \cdot LS \\
& - \sum_l^L aa_l \cdot AW
\end{aligned} \tag{5.67}$$

$$\sum_l^L \sum_i^N x_{i,j,l} = 1 \quad \forall j \in N \setminus \{Abnehmer\} : i \neq j \tag{5.68}$$

$$\sum_j^{N \setminus \{Depot\}} x_{Depot,j,l} = 1 \quad \forall l \in L \tag{5.69}$$

$$\sum_i^N x_{i,j,l} - \sum_i^N x_{j,i,l} = 0 \quad \forall j \in N \setminus \{Depot, Abnehmer\}, l \in L \quad (5.70)$$

$$\sum_i^{N \setminus \{Abnehmer\}} x_{i,Abnehmer,l} = 1 \quad \forall l \in L \quad (5.71)$$

$$w_{i,l} + ST_i + F_{i,j} - w_{j,l} \leq (1 - x_{i,j,l}) \cdot M \quad \forall i, j \in N, l \in L \quad (5.72)$$

$$w_{i,l} \cdot \sum_j^N x_{i,j,l} \leq w_{i,l} \quad \forall i \in n \setminus \{Depot\}, l \in L \quad (5.73)$$

$$S \leq w_{i,l} \quad \forall i \in \{Depot, Abnehmer\}, l \in L \quad (5.74)$$

$$E \geq w_{i,l} \quad \forall i \in \{Depot, Abnehmer\}, l \in L \quad (5.75)$$

$$\sum_i^N \sum_j^N kg_i \cdot x_{i,j,l} \leq K^{KG} \quad \forall l \in L \quad (5.76)$$

$$\sum_i^N \sum_j^N m3_i \cdot x_{i,j,l} \leq K^{M3} \quad \forall l \in L \quad (5.77)$$

$$AZ \cdot aaz_l \geq w_{Abnehmer,l} - (1 - aaz_l) \cdot M \quad l \in L \quad (5.78)$$

$$aae_l \leq \sum_j^Z x_{Depot,j,l} \quad \forall l \in L \quad (5.79)$$

$$2 \cdot aa_l \leq aaz_l + aae_l \quad \forall l \in L \quad (5.80)$$

$$a_{l1,l2} = |w_{Abnehmer,l1} - w_{Abnehmer,l2}| \quad \forall l1, l2 \in L \quad (5.81)$$

$$a_{l1,l2} + ls_{l1,l2} \geq ST_{Abnehmer} \quad \forall l1, l2 \in L \quad (5.82)$$

Symbol	Bedeutung
$a_{l,l}$	Gemeinsame Standzeit von Fahrzeug l1 und l2
aa_l	Indikator für erreichten Anschlussauftrag mit Fahrzeug l
aae_l	Indikator für erreichten Anschlussauftrag mit eingesetztem Fahrzeug l
aa_z_l	Indikator für zeitlich erreichten Anschlussauftrag mit Fahrzeug l
kg_n	Gewicht der Teile von Lieferant n
$ls_{l1,l2}$	Strafminuten für die Überschneidung von Fahrzeug l1 und l2
$m3_n$	Volumen der Teile von Lieferant n
$w_{i,l}$	Zeitfenster für die Anfahrt von Knoten i mit Fahrzeug l
wil_n	Frühester Anfahrzeitpunkt für Lieferant n
$x_{i,j,l}$	Streckenindikator für Fahrzeugbewegung von Knoten i zu j mit Fahrzeug l

Tabelle 5.4.: Zusätzliche/geänderte Symbole des VRPTW

Die Zielfunktion entspricht dem den Transport betreffenden Teil der Zielfunktion des integrierten Modells. Restriktion 5.68 sorgt dafür, dass alle Knoten angefahren werden. Restriktion 5.69 sorgt dafür, dass jeder LKW das Depot verlässt. Restriktion 5.70 stellt sicher, dass jeder besuchte Knoten auch wieder verlassen wird. Restriktion 5.71 fordert, dass jeder LKW beim Abnehmer eintrifft. Über Restriktion 5.72 wird die Einhaltung der Zeitfenster bei den Lieferanten unter Berücksichtigung von Fahr- und Standzeit sichergestellt. Mittels Restriktion 5.73 ist garantiert, dass der Anfahrzeitpunkt beim einem Lieferanten nach der Fertigstellung des abzuholenden Teiles liegt. Die Restriktionen 5.74 und 5.75 legen die Zeitfenster für Depot und Abnehmer fest. Die Einhaltung der Kapazitätsrestriktionen hinsichtlich Gewicht und Volumen wird über die Restriktionen 5.76 und 5.77 sichergestellt. Über die Restriktionen 5.78 und 5.79 wird festgestellt, ob ein Anschlussauftrag zeitlich und mit einem tatsächlich eingesetztem Fahrzeug erreicht wurde. Ist beides der Fall, so setzt Restriktion 5.80 den Indikator aa_l , der in der Zielfunktion genutzt wird. Um die gemeinsame Standzeit von LKW mit Kosten zu hinterlegen, setzt zunächst Restriktion 5.81 die Variable $a_{l1,l2}$ auf die Differenz der Ankunftszeiten zweier LKW, die anschließend mittels Restriktion 5.82 die Variable $ls_{l1,l2}$ auf die gemeinsame Standzeit beim Abnehmer festlegt, die in der Zielfunktion mit Strafkosten aufgeführt wird.

5.2.2. Integrierte Lösung

Die integrierte Lösung bezieht sowohl bei der über- als auch der innerperiodischen Planung den Transport simultan mit ein und nähert sich auf diese Weise dem globalen Gesamtoptimum an, wobei jedoch entsprechend der Definition einer Heuristik nicht ausgeschlossen werden kann, dass die optimale Lösung nicht gefunden wird. Dafür allerdings lassen sich in akzeptabler Zeit Produktions- und Transportpläne erstellen. Die Lösung basiert auf den in 2.2.1 und 2.2.2 gemachten Beobachtungen. Dabei soll zunächst in der überperiodischen Betrachtung die Losgrößenfindung in Kombination mit den resultierenden Touren durchgeführt werden. Auf diese Weise wird vermieden, dass bedingt durch die Kapazitätsrestriktionen der LKW mehr Fahrzeuge zum Transport eingesetzt werden müssen als dies bei optimaler Zusammenstellung nötig wäre. An dieser Stelle liegt das größte Einsparpotenzial, denn schlecht ausgelastete Fahrzeuge erzeugen eine Vielzahl von Nachteilen. Neben finanziellen Mehrkosten, die durch zusätzlich eingesetzte Fahrzeuge und deren Fahrern entstehen, steigt die ökologische Belastung durch Abgase. Darüber hinaus kommt es zu einem steigenden Verkehrsaufkommen und da auch die Straßen eine begrenzte Ressource darstellen, wird diese nicht optimal genutzt, wobei wiederum für andere Akteure Nachteile entstehen. Im Extremfall ist sogar der Servicelevel gemessen an pünktlicher Abholung und Zustellung betroffen. Durch das Abbilden der Lose auf Touren können diese Probleme bereits bei der Produktionsplanung erkannt und in die Lösung einbezogen werden. In der innerperiodischen Planung soll anschließend ein Ausgleich zwischen Rüstkosten und Routen stattfinden. Da die Produktionsreihenfolge direkt die möglichen Anfahrtszeitpunkte bestimmt, kann durch integrierte Betrachtung erkannt werden, wann es vorteilhaft ist eine schlechtere Produktionssequenz zu akzeptieren, um dadurch eine kürzere Route fahren zu können. Hinzu kommen zwei weitere Aspekte, die für den Spediteur von Relevanz sind. Zum einen ist dies der Wunsch die Tour möglichst früh abzuschließen, um unter Umständen einen weiteren Auftrag durchführen zu können, zum anderen soll es vermieden werden mit mehreren Fahrzeugen gleichzeitig beim Abnehmer einzutreffen. Die folgenden Abschnitte zeigen die modifizierten Planungsschritte unter Einbeziehung des jeweiligen logistischen Rahmens.

5.2.2.1. Überperiodisch

Entsprechend der sukzessiven Lösung ist es auch bei der integrierten Lösung zunächst das Ziel, für jeden Lieferanten periodenweise die zu fertigenden Lose zu bestimmen. Al-

lerdings soll dies bereits in Abstimmung mit der Transportplanung erfolgen. Nun ist die Kopplung mit einem VRP erneut zu rechenintensiv, um Instanzen in angemessener Größenordnung lösen zu können. Daher beschränkt sich die Planung im Einklang mit den Zielen der überperiodischen Planung, nämlich der Reduzierung von eingesetzten LKW durch eine verbesserte Verteilung der benötigten Mengen auf die Produktionsperioden, auf eine Zuweisung von Lieferanten auf Touren ohne die gefahrene Route zu bestimmen. Dies ist analog zur Big Bucket-Produktionsplanung, die zwar die in einer Periode gefertigten Mengen festlegt, nicht aber deren Herstellungsreihenfolge, erfolgt simultan die Tourenplanung, die zwar Lieferanten einer gemeinsamen Tour bzw. einem Fahrzeug zuordnet, jedoch nicht festlegt, in welcher Reihenfolge diese angefahren werden. Die Kapazitätsrestriktionen hinsichtlich Gewicht und Volumen müssen dabei eingehalten werden. Um die Güte der gefundenen Touren abzuschätzen, werden zusätzlich zu den Fixkosten für den Einsatz eines Fahrzeugs die Entfernungskosten der Strecken zwischen allen Knoten einer Tour untereinander addiert, durch vier geteilt und mit den variablen Kosten multipliziert. Bei einer zu erwartenden Tourgröße von zwei bis fünf Lieferanten liefert diese Vorgehensweise gute Ergebnisse. Bei vier Lieferanten gibt es zwölf gerichtete Kanten, die gewichtet werden. Beim Teilen der Gesamtstrecke durch vier ergibt sich die durchschnittliche Länge dreier Kanten, was der Anzahl der befahrenen Kanten entspricht. Entsprechend wird die Distanz in einer größeren Tour etwas über- und in kleineren Touren unterschätzt. Eine bessere lineare Annäherung scheint jedoch nicht möglich. In Tabelle 5.5 sind die zusätzlichen und geänderten Symbole des Modells zu finden. Das entsprechende OPL-Modell ist in Anhang A.6 aufgeführt.

Symbol	Bedeutung
I_p	Indikator für interne Teile p
$LP_{z,p}$	Zuordnung von Lieferant z und Teil p
$ia_{p,t}$	Lagerbestand des Abnehmers an Teilen p in Periode t
$il_{z,p,t}$	Lagerbestand des Lieferanten z an Teilen p in Periode t
$q_{z,p,t}$	Losgröße für Teil p bei Lieferant z in Periode t
$ri_{z,p,t}$	Rüstindikator für Teil p bei Lieferant z in Periode t
$tp_{z,p,l,t}$	Transportierte Teile p von Lieferant z in LKW l in Periode t
$x_{l,z,t}$	Anfahrtsindikator für LKW l zu Lieferant z in Periode t
$xC_{z1,z2,t}$	Tourenindikator für Lieferanten z1 und z2 in Periode t
$xe_{l,t}$	Indikator für eingesetzten LKW l in Periode t

Tabelle 5.5.: Zusätzliche/geänderte Symbole des CLSP-TC

$$\begin{aligned}
\text{minimize } \rightarrow & \sum_z^Z \sum_p^P \sum_t^T RZ_p \cdot ri_{z,p,t} \\
& + \sum_z^Z \sum_p^P \sum_t^T i_{z,p,t} \cdot LK_p \\
& + \sum_{z1}^Z \sum_{z2}^Z \sum_t^T \frac{xc_{z1,z2,t} \cdot C_{z1,z2} \cdot (KK + EK)}{4}
\end{aligned} \tag{5.83}$$

$$i_{z,p,t} = i_{z,p,t-1} - DE_{p,t} \cdot LP_{z,p} - DI_{p,t} \cdot LP_{z,p} + q_{z,p,t} \quad \forall z \in Z, p \in P, t \in T \tag{5.84}$$

$$i_{z,p,0} = B_p^{\min} \cdot LP_{z,p} \quad \forall z \in Z, p \in P \tag{5.85}$$

$$i_{z,p,t} \geq B_p^{\min} \cdot LP_{z,p} \quad \forall z \in Z, p \in P, t \in T \tag{5.86}$$

$$i_{z,p,t} \leq B_p^{\max} \cdot LP_{z,p} \quad \forall z \in Z, p \in P, t \in T \tag{5.87}$$

$$q_{z,p,t} - M \cdot ri_{z,p,t} \leq 0 \quad \forall z \in Z, p \in P, t \in T \tag{5.88}$$

$$\sum_p^P (PZ_p \cdot q_{z,p,t} + RZ_p \cdot ri_{z,p,t}) \leq K \quad \forall z \in Z, t \in T \tag{5.89}$$

$$ri_{z,p,t} \leq LP_{z,p} \quad \forall z \in Z, p \in P, t \in T \tag{5.90}$$

$$\sum_l^L tp_{z,p,l,t} = q_{z,p,t} \cdot I_p \quad \forall z \in Z, p \in P, t \in T \tag{5.91}$$

$$\sum_z^Z \sum_p^P tp_{z,p,l,t} \cdot V_p \leq K^{M3} \quad \forall l \in L, t \in T \quad (5.92)$$

$$\sum_z^Z \sum_p^P tp_{z,p,l,t} \cdot G_p \leq K^{KG} \quad \forall l \in L, t \in T \quad (5.93)$$

$$xc_{z1,z2,t} \geq x_{l,z1,t} + x_{l,z2,t} - 1 \quad \forall z1, z2 \in Z, l \in L, t \in T \quad (5.94)$$

$$\sum_l^L x_{l,z,t} \leq 1 \quad \forall z \in Z, t \in T \quad (5.95)$$

$$\sum_p^P tp_{z,p,l,t} \leq M \cdot x_{l,z,t} \quad \forall z \in Z, l \in L, t \in T \quad (5.96)$$

Die Zielfunktion besteht aus drei Komponenten. Die Produktion betreffend werden reihenfolgeunabhängige Rüstkosten für jedes in einer Periode produzierte Los berücksichtigt; hinzu kommen Lagerhaltungskosten. In der dritten Zeile werden die streckenabhängigen Fahrtkosten der auf einer Tour enthaltenen Lieferanten untereinander aufsummiert. Die Variable $xc_{z1,z2,t}$ ist genau dann 1, wenn die Lieferanten $z1$ und $z2$ in Periode t gemeinsam auf einer Tour liegen. Da dies auch umgekehrt der Fall ist, jedoch nur eine dieser Strecken befahren würde, werden die Kosten jeweils halbiert. Dieser Wert ist als Schätzgröße für die Routenlänge jedoch noch zu hoch. Beispielsweise existieren sechs ungerichtete Kanten in einem Graphen mit vier Knoten, davon werden drei benötigt, um alle Knoten zu besuchen. Daher wird der Wert abermals halbiert, was tendenziell bei kleineren Touren zu einer Unterschätzung und bei größeren Touren zu einer Überschätzung der Strecke führt, aber eine gewisse Näherung darstellt.

Die Restriktion 5.84 ist die Lagerbestandsgleichung. Der aktuelle Lagerbestand ergibt sich aus dem der Vorperiode abzüglich interner und externer Teile, die bei dem entsprechenden Lieferanten gefertigt werden und zuzüglich der in der Periode produzierten Lose. Restriktion 5.85 legt den Anfangsbestand für beim Lieferanten gefertigte Teile auf den Mindestbestand fest. Die Einhaltung des Mindest- und Maximalbestands erfolgt durch die Restriktionen 5.86 und 5.87. Restriktion 5.88 setzt den Rüstindikator. Restriktion 5.89 ist für die Einhaltung der Kapazitätsrestriktion zuständig. Mittels Restriktion 5.90

wird die Zuordnung von Teilen zu Lieferanten bestimmt. Restriktion 5.91 bestimmt, dass Lose interner Teile zum LLZ transportiert werden müssen. Über die Restriktionen 5.92 und 5.93 werden die Kapazitätsgrenzen der LKW bezüglich Volumen und Gewicht eingehalten. In Restriktion 5.94 wird die Variable xc auf den Wert 1 gezwungen, wenn die Lieferanten $z1$ und $z2$ in einer Periode von demselben LKW besucht werden, sie sich also auf einer gemeinsamen Tour befinden. Restriktion 5.95 stellt sicher, dass ein Lieferant in einer Periode nur von maximal einem Fahrzeug besucht wird. Zuletzt koppelt Restriktion 5.96 die Fahrzeugbewegung an den Materialfluss.

5.2.2.2. Innerperiodisch

Aufbauend auf den Ergebnissen der überperiodischen Planung erfolgt innerperiodisch die Sequenzierung der Lose und die Bestimmung der Route jeweils simultan für alle Lieferanten, die gemeinsam auf einer Tour liegen. Dazu kann wiederum ein Lot Sequencing zum Einsatz kommen, allerdings muss im integrierten Fall das Vehicle Routing mit eingebunden werden. Dazu wird das in 5.2.1.2 vorgestellte Modell genutzt und um die folgenden Symbole (vgl. Tabelle 5.6) und Restriktionen erweitert. Die Komplexität des Modells steigt damit an; da jedoch üblicherweise nur etwa drei bis fünf Lieferanten auf einer Tour liegen, ist dies auch für große Probleminstanzen vernachlässigbar.

Das Vehicle Routing Problem ist ein analog zu 5.2.1.2.2 erweitertes VRPTW (vgl. 3.1.3.5), das mit dem Sequenzierungsmodell gekoppelt wird. Um das Zeitfenster für das Eintreffen eines LKW zu bestimmen, wird für die Aktivitäten eine Zeitvariable t mitgeführt. t erhöht sich pro Aktivität um die Produktionszeit des Loses zuzüglich der anfallenden Rüstzeit. Der Fertigstellungszeitpunkt des abzuholenden internen Teils wird ermittelt, indem er größer oder gleich aller Fertigstellungszeitpunkte gesetzt wird, wobei für die externen Teile eine große Zahl subtrahiert wird, sodass die Zeitpunkte hierfür nicht relevant sind.

Das Modell wird als „Integrated Vehicle Routing Lot Scheduling“ bezeichnet und findet sich als OPL-Modell in Anhang A.7. Tabelle 5.6 fasst die neuen und geänderten Symbole der mathematischen Darstellung zusammen.

Symbol	Bedeutung
G_p	Komplettgewicht von Los p
V_p	Komplettvolumen von Los p
VL	Menge der Ankunftszeiten der Fahrzeuge vorheriger Touren der gleichen Periode
$a2_{l1,vl}$	Gemeinsame Standzeit von Fahrzeug l1 und vl
fs_z	Zeitpunkt der Fertigstellung aller internen Teile bei Lieferant z
$ipi_{z,a}$	Indikator für die Produktion eines internen Teils in Aktivität a bei Lieferant z
$ls2_{l1,vl}$	Strafminuten für die Überschneidung von Fahrzeug l1 und vl
$t_{z,a}$	Zeitpunkt nach Aktivität a bei Lieferant z

Tabelle 5.6.: Zusätzliche Symbole des IVRLS

$$\begin{aligned}
\text{minimize} \rightarrow & \sum_z \sum_{p1}^P \sum_{p2}^P \sum_a^A ri_{z,p1,p2,a} \cdot RZ_{p1,p2} \cdot OK_z \\
& + \sum_i^N \sum_j^N \sum_l^L C_{i,j} \cdot (KK + EK) \cdot x_{i,j,l} \\
& + \sum_l^L (w_{Abnehmer,l} - w_{Depot,l}) \cdot \frac{FR}{60} \\
& + \sum_l^L FZ \cdot \sum_j^Z x_{Depot,j,l} \\
& + \sum_{l1}^L \sum_{l2}^L ls_{l1,l2} \cdot LS \\
& + \sum_{l1}^L \sum_{vl}^{VL} ls2_{l1,vl} \cdot LS \\
& - \sum_l^L aa_l \cdot AW
\end{aligned} \tag{5.97}$$

$$\sum_p^P \sum_a^A PZ_p \cdot r_{z,a,p} + \sum_{p1}^P \sum_{p2}^P \sum_a^A ri_{z,p1,p2,a} \cdot RZ_{p1,p2} \leq K \quad \forall z \in Z \tag{5.98}$$

$$t_{z,0} = SZ \quad \forall z \in Z \tag{5.99}$$

$$r_{z,0,0} = 1 \quad \forall z \in Z \tag{5.100}$$

$$\sum_p^P r_{z,a,p} = 1 \quad \forall z \in Z, a \in A \quad (5.101)$$

$$\sum_a^A r_{z,a,p} = LP_{z,p} \quad \forall p \in P, z \in Z \quad (5.102)$$

$$2 \cdot r_{z,p1,p2,a} \geq r_{z,a,p2} + r_{z,a-1,p1} \quad \forall z \in Z, p1, p2 : p1 \neq p2 \in P, a \in A \quad (5.103)$$

$$\sum_p^P r_{z,p,0,a} = 0 \quad \forall z \in Z, a \in A \setminus \{1\} \quad (5.104)$$

$$\sum_i^N \sum_z^Z x_{i,z,l} \cdot G_{TP_z} \leq K^{KG} \quad \forall l \in L \quad (5.105)$$

$$\sum_i^N \sum_z^Z x_{i,z,l} \cdot V_{TP_z} \leq K^{M3} \quad \forall l \in L \quad (5.106)$$

$$\sum_j^{N \setminus \{Depot\}} x_{Depot,j,l} = 1 \quad \forall l \in L \quad (5.107)$$

$$\sum_i^N x_{i,z,l} - \sum_i^N x_{z,i,l} = 0 \quad \forall z \in Z, l \in L \quad (5.108)$$

$$\sum_i^{Z \cup \{Depot\}} x_{i,Abnehmer,l} = 1 \quad \forall l \in L \quad (5.109)$$

$$w_{i,l} + ST_i + F_{i,j} - w_{i,j} \leq (1 - x_{i,j,l}) \cdot M \quad \forall i \in N, j \in N, l \in L \quad (5.110)$$

$$S \leq w_{i,l} \quad \forall i \in \{Depot, Abnehmer\}, l \in L \quad (5.111)$$

$$E \geq w_{i,l} \quad \forall i \in \{Depot, Abnehmer\}, l \in L \quad (5.112)$$

$$\sum_i^{Z \cup \{Depot\}} \sum_l^L x_{i,z,l} = 1 \quad \forall z \in Z \quad (5.113)$$

$$w_{z,l} \geq fs_z \quad \forall z \in Z, l \in L \quad (5.114)$$

$$AZ \cdot aa_{z_l} \geq w_{Abnehmer,l} - (1 - aa_{z_l}) \cdot M \quad \forall l \in L \quad (5.115)$$

$$aa_{e_l} \leq \sum_j^{N \setminus \{Abnehmer\}} x_{Depot,j,l} \quad \forall l \in L \quad (5.116)$$

$$2 \cdot aa_l \leq aa_{z_l} + aa_{e_l} \quad \forall l \in L \quad (5.117)$$

$$a_{l_1,l_2} = |w_{Abnehmer,l_1} - w_{Abnehmer,l_2}| \quad \forall l_1, l_2 \in L \quad (5.118)$$

$$a_{l_1,l_2} + ls_{l_1,l_2} \geq ST_{Abnehmer} \quad \forall l_1, l_2 : l_1 > l_2 \in L \quad (5.119)$$

$$a_{2_{l,vl}} = |w_{Abnehmer,l} - AN_{vl}| \quad \forall l \in L, vl \in VL \quad (5.120)$$

$$a_{2_{l,vl}} + ls_{2_{l,vl}} \geq ST_{Abnehmer} \quad \forall l \in L, vl \in VL \quad (5.121)$$

$$t_{z,a} = t_{z,a-1} + \sum_{p1}^P \sum_{p2}^P r_{i_{z,p1,p2,a}} \cdot RZ_{p1,p2} + \sum_p^P \sum_a^A r_{z,p,a-1} \cdot PZ_p \quad \forall z \in Z, a \in A \quad (5.122)$$

$$2 \cdot ipi_{z,a} \cdot M \geq r_{z,a,p} + I_p \quad \forall z \in Z, p \in P, a \in A \quad (5.123)$$

$$fs_z \geq t_{z,a} - M \cdot (1 - ipi_{z,a}) \quad \forall z \in Z, a \in A \quad (5.124)$$

Die Zielfunktion bewirkt die Kostenminimierung der Produktions- und Transportkosten. Zeile eins ermittelt die durch die Sequenzierung anfallenden Rüstkosten. Die Zeilen zwei und drei ermitteln die streckenabhängigen Kosten, Zeile vier die Fahrzeugfixkosten. Zeile 5 bestraft die gemeinsame Standzeit zweier Fahrzeuge der Modellinstanz, Zeile 6 hingegen die zwischen einem Fahrzeug dieser Instanz und einem Fahrzeug einer vorherigen Instanz der gleichen Periode aber einer anderen Tour. Zuletzt belohnt Zeile 7 das Erreichen eines Anschlussauftrages.

Restriktion 5.98 sorgt für die Einhaltung der Kapazitätsrestriktion hinsichtlich Produktions- und Rüstzeiten. Restriktion 5.99 legt wie im sukzessiven Fall den Startzeitpunkt auf 15 Uhr des vorherigen Tages fest. Der initiale Rüstzustand wird durch Restriktion 5.100 auf Teil 0 festgelegt, das wiederum bei der Ausführung mit dem zuletzt gefertigten Teil belegt wird. Über Restriktion 5.101 wird ein eindeutiger Rüstzustand erzwungen. Restriktion 5.102 schränkt die Möglichkeit der produzierbaren Teile auf die dem Lieferanten zugewiesenen ein. Restriktion 5.103 setzt den Rüstindikator ri . Restriktion 5.104 verhindert ein Rückspringen des Rüstzustandes in den Anfangszustand. Die Restriktionen 5.105 und 5.106 halten die Restriktionen der Fahrzeuge bezüglich Gewicht und Volumen ein. Restriktion 5.107 fordert, dass jedes Fahrzeug das Depot verlassen muss. Restriktion 5.108 legt fest, dass jeder besuchte Lieferant wieder verlassen werden muss. Restriktion 5.109 stellt sicher, dass jedes Fahrzeug beim Abnehmer ankommt. Restriktion 5.110 ist für die Einhaltung der Zeitfenster unter Beachtung der Fahrzeit zuständig, die Restriktionen 5.111 und 5.112 für das früheste Verlassen des Depots bzw. die späteste Ankunft beim Abnehmer. Die Anfahrt jedes Lieferanten wird über Restriktion 5.113 sichergestellt. Dazu wird über Restriktion 5.114 der früheste Anfahrtszeitpunkt eingehalten. Restriktion 5.115 legt fest, ob ein Anschlussauftrag erreicht wurde. Dafür stellen die Restriktionen 5.116 und 5.117 das Erreichen mit einem eingesetzten Fahrzeug und die rechtzeitige Ankunft fest. Restriktion 5.118 misst die Differenz der Ankunftszeiten zweier LKW. Restriktion 5.119 legt die Strafminuten dafür fest. Das selbe geschieht durch die Restriktionen 5.120 und 5.121 für LKW, die in der gleichen Periode, aber auf anderen Touren eingesetzt wurden.

Die Zeit wird über Restriktion 5.122 fortgeschrieben. Restriktion 5.123 zwingt die Binärvariable $ipi_{z,a}$ auf 1, falls Lieferant z in Aktivität a ein Los interner Teile produziert hat. ipi wird von Restriktion 5.124 genutzt, um den Fertigstellungszeitpunkt zu ermitteln, der größer oder gleich sein muss als alle Zeitpunkte, zu denen ein internes Los fertiggestellt wurde.

5.3. Herleitung des praxisorientierten Verfahrens

Das gezeigte Verfahren optimiert zwar die Lieferkette als Ganzes, agiert jedoch aus zentraler Sicht und nimmt keinen Kosten- und Nutzensausgleich vor. Damit verstößt es gegen zentrale Forderungen (vgl. 2.4.2) bezüglich der Umsetzbarkeit in der Praxis. Daher wird aufbauend auf den bisherigen Ergebnissen das Planungsverfahren dezentralisiert. Vorab ist für den Praxiseinsatz auch das überarbeitete Belieferungsverfahren (vgl. 3.2) zu spezifizieren.

5.3.1. Belieferungskonzept und Prozessgestaltung

In der Einleitung wurde bereits ausgeführt, dass eine operative Steuerung der Supply Chain unter Beachtung der Ziele aller Beteiligten nur in Kooperation erreicht werden kann. Neben eher strategisch-taktischen Fragen wie der Auswahl der Lieferanten oder der Ausgestaltung der Verträge ist die Zusammenarbeit auf operativer Ebene zu klären, d.h. welche Belieferungsform gewählt und wie wird der Bestell- und Anlieferungsprozess ausgestaltet? Just-in-Time und Just-in-Sequence-Konzepte sind ausgeschlossen, da bei diesen kein Spielraum für Transportoptimierung gegeben ist. Ihme führt aus, dass für JiT-Belieferung Fahrstrecken zwischen Lieferant und Abnehmer gefordert werden, die „weder stauanfällig sein sollen, noch über Bahnübergänge oder mehrere Ampelkreuzungen führen dürfen“ [Ihm06, S. 303]. Nicht zuletzt weisen JiT-gelieferte Teile, noch mehr JiS-gelieferte Teile, nur sehr geringe Mengenschwankungen auf, die so eine gleichmäßig getaktete Anlieferung ermöglichen. Dem entgegengesetzt sind Teile, die lagerhaltig beschafft werden. Die Bedarfsmengenschwankungen führen zu Problemen bei den Lieferanten und dem Spediteur und bieten sich somit für einen koordinierten Prozess an. Zur lagerhaltigen Beschaffung existieren bereits einige Konzepte (vgl. 3.2.1.2), von denen allerdings keins die geforderten Eigenschaften aufweist.

Die operative Kooperationssteuerung kann letztendlich von jedem der beteiligten Akteure übernommen werden. Folgende Möglichkeiten existieren, um die jeweiligen Liefermengen und -termine besser aufeinander abzustimmen (in den Abbildungen stellen durchgezogene Linien Abstimmungen dar, gestrichelte Linien bloße Informationsweitergabe):

- Koordination durch den Abnehmer

In diesem Fall liegt eine 1:n:1-Koordination vor, d.h. ein Abnehmer koordiniert n Lieferanten und einen Spediteur, es sind also $n + 1$ Verhandlungsinstanzen notwendig. Dieser Fall ist in Abbildung 5.3 dargestellt. Eine Analogie besteht zu den in 3.2.1.2.1 vorgestellten Prozessen. Der Abnehmer ist in der zentralen Position und erstellt initiale Abrufe, die bereits hinsichtlich der Fahrzeugrestriktionen aufeinander abgestimmt sein können. Darauf folgen die Rückmeldungen der Beteiligten. Dieser Prozess gleicht dem in der VDA-Empfehlung 5004 [Ver03a] beschriebenen Pickup-Prozess. Hier ist allerdings nur dann ein Abstimmungsprozess vorgesehen, wenn „der Zulieferer die Bereitstellung der Menge der geforderten Waren in der vom Empfänger vorgeschriebenen Gebindestruktur [...] nicht realisieren kann“ [Ver03a, S. 17]. Eine Abstimmung, um den Lieferanten oder dem Spediteur entgegenzukommen, ist nicht vorgesehen. An dieser Stelle müsste folglich die Verhandlungsphase beginnen, bei der Änderungswünsche zurückgemeldet werden und der Abnehmer Pläne anpasst und bekannt gibt.

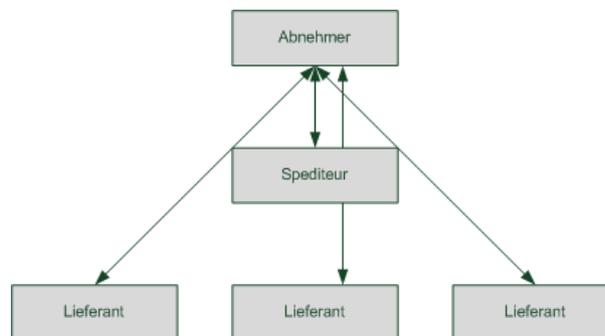


Abbildung 5.3.: Abnehmer-zentrierte Sicht

- Koordination durch die Lieferanten

In diesem Fall liegt eine $n:(n-1):1$ -Koordination vor, d.h. n Lieferanten stimmen sich mit $(n-1)$ Lieferanten und einem Spediteur ab, es werden also $\frac{n \cdot (n+1)}{2}$ Verhandlungsinstanzen⁶ notwendig. Dieser Fall ist in Abbildung 5.4 dargestellt. Der Abnehmer

⁶Es stimmen sich n Lieferanten untereinander und mit dem Spediteur ab, es existieren also $n+1$ Planungsentitäten.

hat in diesem Fall vorab minimale und maximale Lagerbestände vorgegeben und ist nicht mehr in die Disposition eingebunden. Dieses Szenario ist mit dem in 3.2.1.2.2 vorgestellten Prozess zu vergleichen, wobei jedoch die Planungen der Lieferanten isoliert voneinander ablaufen.

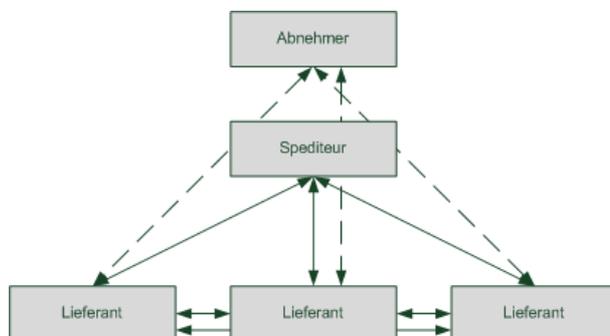


Abbildung 5.4.: Lieferanten-zentrierte Sicht

- Koordination durch den Spediteur

In diesem Fall liegt eine 1:n-Koordination vor, d.h. 1 Spediteur stimmt sich mit n Lieferanten ab. Dieser Fall ist in Abbildung 5.5 dargestellt. Aus Sicht eines Lieferanten kann ebenso eine 1:n-Beziehung vorliegen, da er nicht zwangsweise mit nur einem Spediteur zusammenarbeiten muss. Diese Koordinationsart entspricht wiederum einem VMI, bei dem allerdings der Spediteur als Ressource in die Planung der Lieferanten einbezogen wird und bei dem die Koordination durch den Spediteur selbst durchgeführt wird.

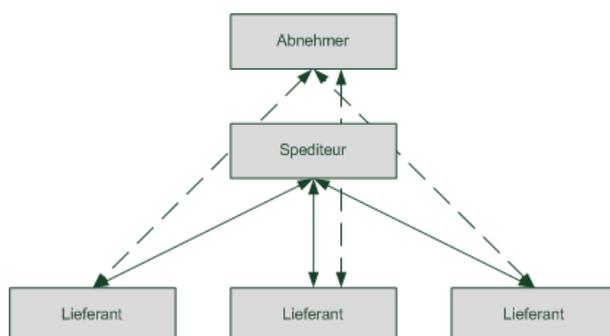


Abbildung 5.5.: Spediteur-zentrierte Sicht

Vor der Gestaltung des dezentralen Lösungsansatzes muss die Belieferungsform festgelegt werden, da die rollenspezifische Implementation und die Verhandlungsprozesse davon

direkt abhängig sind. Im Vergleich scheint es, als hätte die Koordination durch den Abnehmer Vorteile durch die geringere Anzahl von Verhandlungsinstanzen und das Vorhandensein eines zentralen Entscheiders. Allerdings stellt sich die Frage, ob der Abnehmer diesen Koordinationsaufwand leisten würde, von dem er nur indirekt profitiert. Zudem ist der Verhandlungsprozess für die Lieferanten intransparent und die Bevorzugung einzelner Lieferanten ist nicht auszuschließen. Aus diesen Gründen wird davon ausgegangen, dass der Abnehmer nur durch die Übermittlung von Prognosen und Lagerbeständen kooperiert und ansonsten nicht in die Verhandlungen eingebunden ist. Weiterhin resultiert aus der Koordination der Lieferanten untereinander ein extrem hoher Aufwand durch die Vielzahl der Kommunikationskanäle. Daher wird der Spediteur als Koordinierungsinstanz gewählt. Dies vereint der Vorteil einfacher Kommunikation damit, dass der Spediteur selbst die Engpassressource darstellt.

Die nächste Entscheidung zur Bestimmung der Belieferungsvariante ist die Positionierung des Bestands. Es ist die abnehmersnahe Lagerhaltung der abnehmerfernen vorzuziehen. Die abnehmersnahe Lagerung sichert die hohe Teileverfügbarkeit, die bei abnehmerferner Lagerung durch kurzfristige Transporte hergestellt werden müsste oder in zweistufiger Lagerhaltung resultieren würde. Somit scheidet eine KANBAN-basierte Steuerung (vgl. 3.2.1.2.1) aus, die verlangt, dass der Lieferant “auf Basis [des] Kanbanabrufs aus seinem Lager mengen- und termingenau die Menge, die lt. Kanbanabruf verbraucht wurde“ [Ver08, S. 21] aniefert. Hierdurch entfällt die Möglichkeit zur Anpassung von Mengen oder Terminen. Gleichzeitig fällt die Entscheidung für ein Konsignationslager, denn der Abnehmer wird nicht bereit sein, die vom Lieferanten vorgegebene Menge abzunehmen. Daraus resultiert die Dispositionsverantwortung, die bei den Lieferanten liegt und die eine Reichweitensteuerung implementieren. Die Lieferfrequenz wird je nach Lieferant unterschiedlich sein, aber voraussichtlich auf Grund der Sammeltouren nicht untertägig sein.

Der neu gestaltete kooperative VMI-Prozess stimmt grundlegend mit dem in 3.2.1.2.2 beschriebenen VMI-Prozess überein und ist in Abbildung 5.6 dargestellt. Dieser Prozess wird so ergänzt, dass sich die Lieferanten mit dem Spediteur abstimmen. Für den Abnehmer ergeben sich keine Änderungen, außer, dass er Informationen über Änderungen an Lieferbeziehungen weitergibt. Wie die Verhandlungen im Einzelnen gestaltet werden ist Gegenstand des nächsten Abschnitts.

Bei der folgenden Betrachtung wird davon ausgegangen, dass sich alle Lieferanten zu jedem Zeitpunkt mit dem Spediteur einig werden. Dies ist in der Praxis zweifelhaft, da

andere Spediteure gegebenenfalls ein besseres Angebot machen. Weitere Spediteure mit einzubeziehen würde jedoch den Modellumfang stark erweitern und in letzter Konsequenz zu einem „Weltmodell“ führen. Stattdessen wird davon ausgegangen, dass die Lieferanten die Verhandlungen parallel mit mehreren Spediteuren führen und nach den jeweiligen Rückmeldungen die Option besitzen den Auftrag zu bestätigen oder zurückzuziehen. Diese Einschränkung behindert nicht die Untersuchung des dezentralen Planungsprozesses.

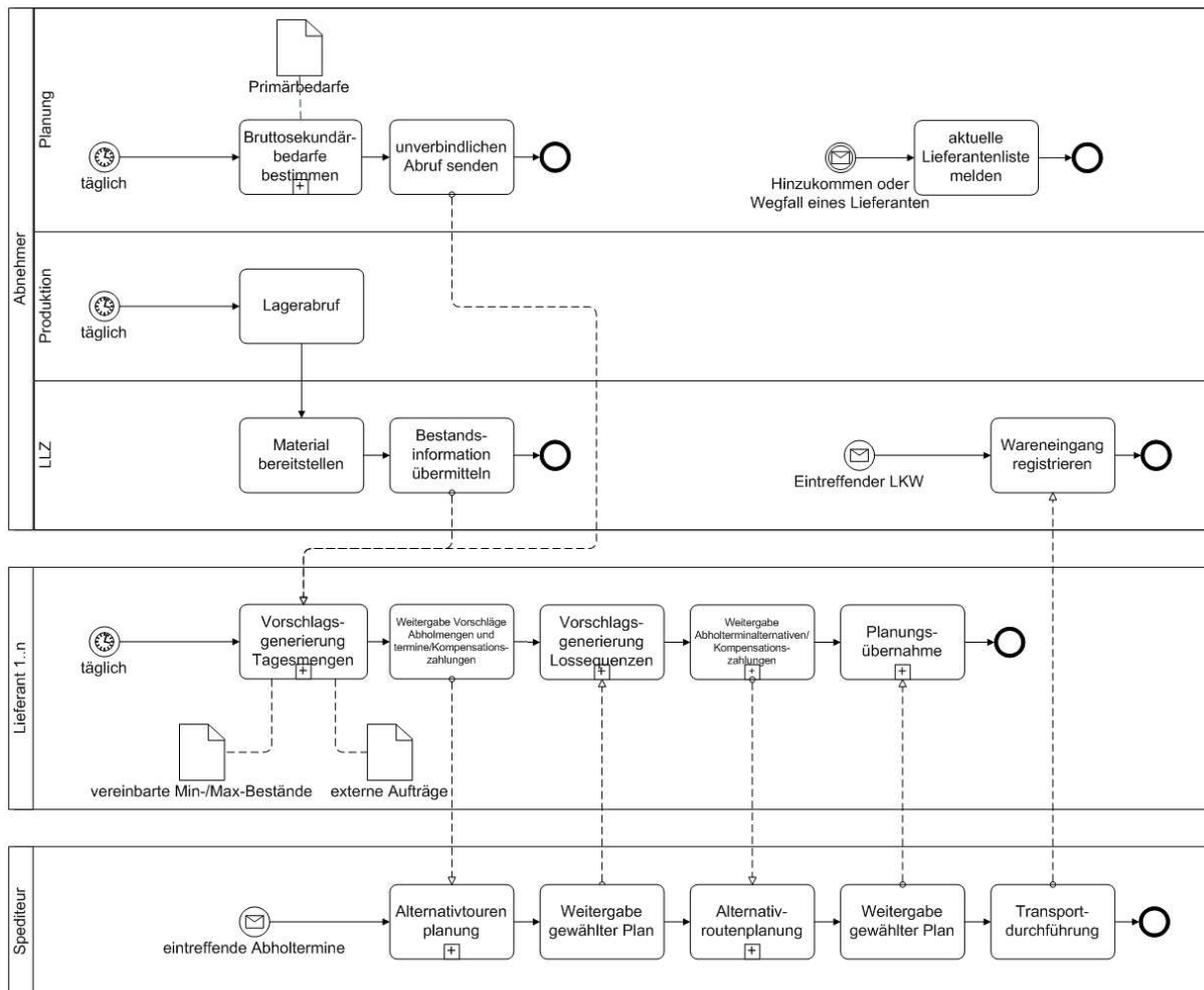


Abbildung 5.6.: Neuer kooperativer VMI-Prozess

5.3.2. Verhandlungsbasierte dezentrale Lösung

Das zuvor beschriebene zentrale Verfahren ist unter Offenlegung aller benötigten Daten in der Lage, eine gute Lösung aus der fiktiven Sicht der gesamten Supply Chain zu finden. Eine gute Lösung soll eine der sukzessiven Planung überlegene, jedoch nicht

notwendigerweise optimale Lösung bezeichnen. Da jedoch die einzelne Entität „Supply Chain“ unternehmerisch nicht existiert, sondern vielmehr aus wirtschaftlich und rechtlich weitgehend unabhängigen Teilnehmern besteht, die zuvorderst an einer Optimierung ihres eigenen Nutzens interessiert sind, kann die gesamtoptimale Lösung lediglich als Referenzwert aufgefasst werden. Im Folgenden wird ein System skizziert, das durch lokale Planung einerseits und Informationsaustausch bzw. Verhandlungen andererseits die Teilnehmer in die Lage versetzen soll, beidseitig vorteilhafte Alternativen aufzudecken und umzusetzen.

Für die Ausgestaltung von kooperativer Koordination sind in 3.4.1 einige Beispiele genannt worden. Für die Umsetzung in dieser Arbeit wurde die Methode „Self Selection“ gewählt. Die hierarchische Antizipation ist ungeeignet, da jeder einzelne Lieferant umfangreiche Informationen über die anderen vom Spediteur bedienten Lieferanten besitzen oder schätzen müsste und bereits die Unkenntnis weniger, aber für die Transportplanung relevanter Daten dazu führt, dass die Abschätzung des Verhaltens des Spediteurs als nachgelagerte Entscheidungsinstanz nur eine geringe Zuverlässigkeit aufweisen wird. Auktionen wiederum sind eine Kooperationsform, die bspw. in Transportbörsen (vgl. 3.3.3) eingesetzt wird. Sie erlauben jedoch keine abgestimmte Planung, da der Spediteur lediglich über die Abgabe eines Gebots seine Bereitschaft zur Durchführung des Auftrags anzeigen kann, nicht jedoch Alternativen, die beide Seiten begünstigen könnten. Dies wird im Ansatz mit Self Selection erreicht. Der Spediteur kann die ihm vorgeschlagenen Alternativen evaluieren und auswählen, sodass eine abgestimmte Lösung zustande kommt. Self Selection bildet dadurch eine Untermenge des Lösungsraums von automatisierten Verhandlungen. Durch Verhandlungen, die aus Vorschlag und Gegenvorschlag bestehen, kann theoretisch durch die größere Anzahl verfügbarer Lösungsvektoren eine noch bessere Alternative gefunden werden. Im Kontext dieser Arbeit wurde dieses Verfahren jedoch verworfen, um eine beherrschbare Komplexität zu erhalten. Diese wäre bei Verhandlungen mit n Lieferanten, wobei jede bilaterale Verhandlungsinstanz direkte Auswirkungen auf die weiteren $n - 1$ parallel laufenden Verhandlungen hat, nicht mehr gegeben. Eine weitreichende Untersuchung von automatisierten Verhandlungen mit mehr als zwei Beteiligten hat in der Literatur noch nicht stattgefunden. Relativ einfach erweitern ließe sich das Verfahren nach Fink (vgl. 3.4.1.1.4), bei dem ein Mediator Vorschläge an alle Beteiligten versendet. Dagegen spricht allerdings, dass es unwahrscheinlich ist, mit vielen Beteiligten Einstimmigkeit zu erzielen, außerdem spricht die in der Praxis vorliegende Machtverteilung dagegen, da nach diesem Verfahren den Beteiligten keine Kompensationszahlungen geboten werden,

für die wiederum dem Mediator auch die internen Kostenfunktionen bekannt sein müssten. Lieferanten müssten also für sie nachteilige Pläne ohne Entschädigung akzeptieren, obwohl sie die für sie vorteilhaften durchsetzen könnten.

5.3.2.1. Konzept eines überperiodischen Planungsprozesses

Analog zur gesamtoptimierenden Heuristik findet zunächst eine überperiodische Abstimmung statt. Davon betroffen sind die Prozessschritte „Vorschlagsgenerierung Tagesmengen“ und „Alternativtoursplanung“ (vgl. Abb. 5.6). Gemäß dem Soll-Prozess erstellen die Lieferanten eine Menge von möglichen Losgrößen über den Planungshorizont. Jeder diese Pläne ist gültig und wird dem Spediteur zur Auswahl übermittelt. Allerdings verursachen die Pläne unterschiedliche Kosten für den Lieferanten; mindestens einer ist für ihn selbst optimal. Daher werden den weiteren Plänen Kosten für ihre Umsetzung zugewiesen. Der Spediteur kann nun, falls dies für ihn vorteilhaft ist, gegen Zahlung der geforderten Kompensationskosten die Umsetzung eines dieser Pläne erbitten. Hat der Lieferant die Kompensationskosten als exakte Differenz zum optimalen Plan angegeben, so ist die Umsetzung eines Alternativplans für ihn kostenneutral und für den Spediteur profitabel. Wurden die Kompensationskosten höher als tatsächlich angegeben und dennoch ein Alternativplan gewählt, so profitieren sogar beide Akteure von der Änderung. Damit ist sichergestellt, dass es im Gegensatz zur Sukzessivplanung zu einer Paretoverbesserung⁷ kommen kann, bzw. dass durch den Verhandlungsprozess keiner der Beteiligten schlechter gestellt werden kann als ohne. Die nächsten beiden Abschnitte behandeln die Erstellung und die Auswahl dieser Produktionspläne.

Ein Auftrag wird definiert als $AT = (p, t, q)$, also einem Tupel aus Teil, Lieferperiode und Menge. Darauf aufbauend ist eine Alternative eine Menge von Aufträgen innerhalb des Planungshorizonts inklusive der bei der Wahl anfallenden Kompensationskosten, $AL = \{(p, t, q)_1, \dots, (p, t, q)_n, kp\}$. Zuletzt besteht das übermittelte Koordinationsangebot aus einer Menge von Alternativen, $KA = \{AL_1, \dots, AL_m\}$. Der Spediteur fällt seine Entscheidung auf Basis der eingehenden Koordinationsangebote $KA_1 \dots KA_z$ und teilt diese den Lieferanten mit. Auf Grund der Strukturannahmen dieser Arbeit muss dabei gelten, dass für jeden Lieferanten z genau eine der Alternativen gewählt wird: $\forall z \in Z : \sum_m g(AL_m \in KA_z) = 1$, wobei die Funktion g angibt, ob eine Alternative gewählt wurde.

⁷Eine Verbesserung, die einen Beteiligten besser stellt ohne die übrigen zu beeinträchtigen.

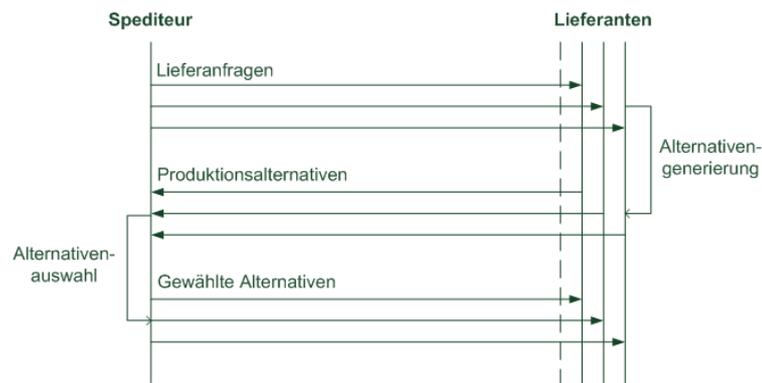


Abbildung 5.7.: Verhandlungsablauf

Der Verhandlungsablauf ist in Abbildung 5.7 dargestellt. Die Lieferanfrage durch den Spediteur an alle beteiligten Lieferanten wird durch diese mit einem Bündel von Produktionsalternativen beantwortet. Nach Eintreffen aller Rückmeldungen fällt der Spediteur eine Auswahl und meldet den Lieferanten, welche Alternative gewählt wurde.

5.3.2.1.1. Generierung der Koordinationsangebote

Aufgabe dieses Prozessschrittes ist die lieferantenseitige Erstellung des Koordinationsangebotes *KA*. Neben der als für den Lieferanten als optimal zu betrachtenden Planung mittels des in 5.2.1.1 beschriebenen Modells sind weitere Alternativen erforderlich. Diese Alternativen sollten im besten Fall auf die Restriktionen und Anforderungen des Spediteurs abgestimmt sein, wozu allerdings keine Informationen vorliegen. Der Lieferant muss somit die Alternativen nach bestimmten Prinzipien erstellen, die eine gute Chance aufweisen, vorteilhaft zu sein. Folgende fünf Verfahren wurden gewählt:

1. Bestrafung bisher genutzter Produktionsperioden

Durch diesen Ansatz sollen die Produktionsperioden möglichst invertiert werden, d.h. Perioden, in denen entsprechend des optimalen Plans produziert wird, werden mit Strafkosten versehen, die die Produktion in diesen Perioden bestraft. Damit werden die Transporttermine maßgeblich geändert und es besteht die Möglichkeit, dass diese Änderung lediglich geringe Mehrkosten in der Produktion erzeugt, jedoch für den Transport sehr vorteilhaft ist. Wird in allen Perioden des Planungshorizonts produziert, so entfällt diese Alternative.

2. Negative Lagerhaltungskosten

Dieser Ansatz führt dazu, dass der bisherige Anreiz möglichst spät zu produzieren, um Lagerhaltungskosten zu sparen, invertiert wird, sodass nun die Produktion so früh wie möglich stattfindet. Auf diese Weise resultiert ein gänzlich anderer Produktionsplan zu vergleichsweise geringen Kosten. Die Alternative unterscheidet sich von der vorherigen dadurch, dass die vorherige möglichst nah an den Perioden mit Strafkosten produzieren wird, während diese auch weitere Spielräume zur frühen Produktion ausnutzt.

3. Produktionsperioden reduzieren

Mittels dieses Ansatzes wird die durchschnittliche Losgröße erhöht, da die gleiche Menge in einer Periode weniger als bei der optimalen Lösung produziert werden muss. Dies führt zu einem Anstieg der Lagerkosten und einer Senkung der Rüstkosten, außerdem wird eine Anfahrt des entsprechenden Lieferanten eingespart. Gegebenenfalls kann auf diese Weise ein Fahrzeugeinsatz gespart werden, falls nicht durch die größeren Mengen zu einem anderen Zeitpunkt ein weiterer notwendig wird. Kann die Lösung auf Grund von Kapazitätsengpässen nicht umgesetzt werden oder wird in nur einer Periode des Planungshorizonts produziert, so entfällt diese Alternative.

4. Weitere Produktionsperiode erzwingen

Dieser Ansatz senkt die durchschnittliche Losgröße, indem die Produktion im Vergleich zur optimalen Lösung auf eine weitere Periode verteilt wird. Dies führt zu einem Anstieg der Rüstkosten und einer Senkung der Bestandskosten, jedoch sind die geringeren Mengen besser auf Touren zuweisbar. Unter Umständen kann so unter Inkaufnahme einer längeren Tour in einer Periode letztendlich ein Fahrzeugeinsatz gespart werden. Kann die Lösung auf Grund von Kapazitätsengpässen nicht umgesetzt werden oder wird bereits nach der optimalen Lösung in allen Perioden des Planungshorizonts produziert, so entfällt diese Alternative.

5. Maximale Losgröße reduzieren

Dieser Ansatz beschränkt die maximale Losgröße in einer Periode auf einen Wert, der 10% kleiner ist, als das größte Los der optimalen Lösung. Dadurch soll erreicht werden, dass eine Alternativlösung für den Fall existiert, dass der Einsatz eines Fahrzeugs notwendig ist, das nur minimal ausgelastet ist, falls dies durch eine umfangreiche Lieferung eines der Lieferanten der Tour ausgelöst wird (vgl. Beispiel in 2.2.1). Je nach Kapazitätsverfügbarkeit kann dieses Vorgehen auch zu einer zusätz-

lichen Produktionsperiode führen und damit äquivalent zu Alternative 4 sein. Wird nur in einer Periode produziert, so entfällt diese Alternative.

Ein Koordinationsangebot besteht demnach aus zwei bis sechs Alternativen. Die lokal optimale Lösung ist in jedem Fall Bestandteil des Koordinationsangebots. Eine noch größere Anzahl von Alternativen würde die Chance erhöhen, dass der Spediteur einen Vorteil erzielen kann. Es muss jedoch beachtet werden, dass der Rechenaufwand zur Bewertung und Auswahl mit weiteren Alternativen beträchtlich steigt. Bei zehn Lieferanten und jeweils fünf Alternativen gibt es bereits $5^{10} = 9765625$ Kombinationsmöglichkeiten, die jeweils mittels Tourenplanung bewertet werden müssen, um die für den Spediteur optimale Kombination zu ermitteln.

Jede Alternative m wird zusätzlich mit Kompensationskosten $k_{p_m} = |f(AL_{opt}) - f(AL_m)|$ für die Auswahl versehen, die die Abweichung in Bezug auf Rüst- und Lagerhaltungskosten vom kostenminimalen Plan darstellen. $f(AL_m)$ beschreibt die Funktion zur Bewertung der Produktionskosten bei Umsetzung von Alternative AL_m . Der Spediteur hat die Auswahl zwischen den Plänen, muss diese aber bezahlen, d.h. er muss die Entscheidung treffen, ob die sich evtl. ergebenden Einsparungen diese Planänderungskosten rechtfertigen.

Zur Erzeugung der Alternativen wird das bestehende Modell modifiziert. Um die in Punkt 1 geforderte Umschichtung der Lose zu bewirken, wird die Zielfunktion um den Summanden $+\sum_t^T ri_{1,t} \cdot INV_t$ ergänzt. INV_t ist gleich 0 für Perioden t , in denen gemäß der optimalen Lösung nicht produziert wird und gleich einer großen Zahl M für Produktionsperioden. Die Modifikation für negative Lagerhaltungskosten ist selbsterklärend. Die Festlegung auf eine bestimmte Anzahl BP von Produktionsperioden erfolgt über die Ergänzung der folgenden Restriktionen:

$$\sum_t^T ri_{1,t} = BP \quad (5.125)$$

Dazu kommt eine Restriktion, um zu verhindern, dass eine Periode fälschlich als Produktionsperiode ausgewiesen wird:

$$q_{p,t} \geq ri_{p,t} \quad \forall p \in P, t \in T \quad (5.126)$$

Im Fall der Erzwingung einer weiteren Produktionsperiode wird auch die folgende Restriktion genutzt. Sie verhindert, dass lediglich ein Teil in einer Periode produziert wird, sodass zwar die Anforderung nach der Anzahl der Produktionsperioden erfüllt, der Plan aber nicht sinnvoll gemessen am verfolgten Ziel ist:

$$q_{1,t} \geq ri_{1,t} \cdot \sum_t^T \frac{D_{1,t}}{BP + 1} \quad (5.127)$$

Die Restriktion erzwingt eine Mindestlosgröße, die etwas unter dem Wert einer Gleichverteilung liegt; so sind für erzwungene drei Rüstvorgänge im Planungshorizont ein Viertel des Gesamtbedarfs die mindestens zu fertigende Anzahl. Bei einem Gesamtbedarf von 100 Teilen muss daher beispielsweise jedes Los mindestens 25 Teile umfassen und eine Lösung „50/49/1“ wird ausgeschlossen.

Für die Restriktion der maximalen Losgröße wird die folgende Restriktion ergänzt, wobei der Parameter $MAXQ$ für die Losgröße des größten Loses der optimalen Lösung steht:

$$q_{1,t} \leq MAXQ \cdot 0.9 \quad (5.128)$$

5.3.2.1.2. Auswahl des Koordinationsangebots

Aufgabe des Spediteurs ist es nun, sich für jeweils eine der bis zu fünf angebotenen Alternativen pro Lieferant zu entscheiden und diese Wahl zurückzumelden. Um diese Auswahl treffen zu können, muss der optimale Transportplan erstellt werden, der die entstehenden Kosten inklusive der evtl. anfallenden Kompensationskosten minimiert. Hier liegt also eine Abweichung von den bislang verwendeten Tourenplanungsmodellen vor. Um die bereits angesprochene Komplexität zu bewältigen, werden nicht alle Kombinationen evaluiert, sondern es wird eine heuristische Suche verwendet. Das Konzept ist in Abbildung 5.8 für den Fall von drei Lieferanten dargestellt. Eine Ellipse repräsentiert eine Kombination aus Alternativen. Durch das Auslesen der jeweils enthaltenen Aufträge sowie der zu zahlenden Kompensationskosten kann eine Bewertung dieser Wahl erfolgen. Beginnend mit der Kombination aus den für die Lieferanten optimalen Alternativen wird in einem Schritt bei einem zufällig gewählten Lieferanten die Alternative gegen eine andere getauscht. Diese neue Kombination wird erneut bewertet; ist sie besser, so wird der Rücktausch als tabu

gekennzeichnet, anderenfalls wird genau diese Vertauschungsoperation tabu. Nach einer bestimmten Anzahl von Schritten wird die beste bislang gefundene Lösung ausgewählt und den Lieferanten mitgeteilt. Dieser akzeptiert die getroffene Entscheidung und hinterlegt sie zur weiteren Planung.

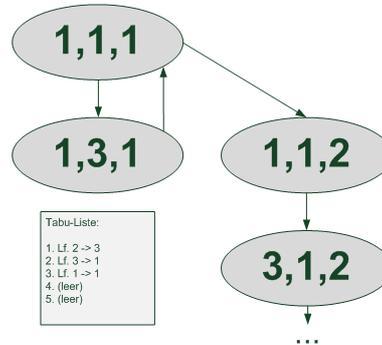


Abbildung 5.8.: Tabu-Suche zur Alternativenauswahl überperiodischer Koordinationsangebote

5.3.2.2. Konzept eines innerperiodischen Planungsprozesses

Die Entscheidung über innerperiodische Sequenzen und Routen fällt analog zum überperiodischen Prozess und betrifft die Schritte „Vorschlagsgenerierung Lossequenzen“ und „Alternativroutenplanung“ (vgl. Abb. 5.6). Wiederum bieten die Lieferanten Koordinationsvorschläge für Abholungszeitpunkte an und hinterlegen diese mit Kosten. Um die Zeitfenster bestimmen zu können, muss in diesem Schritt ein Auftrag mit einem Abholtermin versehen werden, es gilt also $AT_i = (p, t, t_{Minute}, q)$. Eine Alternative enthält ebenso eine Menge von zusammengehörigen Aufträgen, $AL_i = \{(p, t, t_{Minute}, q)_1, \dots, (p, t, t_{Minute}, q)_n, kp\}$ und darauf aufbauend ein Angebot wiederum eine Menge von Alternativen.

5.3.2.2.1. Generierung der Koordinationsangebote

Zusätzlich zu der nach Modell 5.2.1.2.1 bestimmten optimalen Lösung, die eine Produktion bis zur Schließung des Transportzeitfensters erlaubt, werden zwei weitere Alternativen erzeugt:

1. Scheduling vor Depotöffnung

Hierbei wird das abzuholende Los zeitlich vor Depotöffnung eingeplant, sodass es

als erstes auf der Tour eingeladen werden könnte. Unter der Annahme, dass zur Planungsperiode mehrere Stunden des vorherigen Tages gehören, ist es nicht notwendig, das Teil zwingend als erstes in der Sequenz der Planungsperiode zu fertigen. Es ist somit sichergestellt, dass, wenn eine kürzere Route auf Grund der Zeitfenster der Lieferanten nicht möglich ist, die betreffende Planung so zu ändern, dass die kürzere Strecke möglich wird. Kann das Scheduling auf Grund der Restriktion nicht gelöst werden, so entfällt diese Alternative.

2. Scheduling zwischen Depotöffnung und Transportzeitfensterende

Hierbei wird das abzuholende Los mittig auf den Zeitpunkt zwischen Depotöffnung und Schließung des Transportzeitfensters eingeplant. Die Annahme ist, dass dieser spätere Zeitpunkt ausreichend ist, um eine kürzere Tour zu ermöglichen, und gleichzeitig genügend Optimierungsspielraum für eine kostengünstige Produktionssequenz lässt. Die Alternative entfällt, falls keine gültige Lösung gefunden werden kann.

Weitere Alternativen, die das abzuholende Los auf alle möglichen Position in der Sequenz vor der in der optimalen Lösung ermittelten einplant, wären möglich. Die Positionen danach sind irrelevant, da eine spätere Abholung innerhalb des Transportzeitfensters möglich ist. Somit wird das Los über die erste Alternative an eine frühe, jedoch unter dieser Randbedingung optimale, Position gesetzt. Alle Verschiebungen vor dem Zeitpunkt der Depotöffnung können nur schlechter in Bezug auf die Rüstkosten und irrelevant bezüglich der Transportkosten sein. Die zweite Alternative setzt den Fertigstellungszeitpunkt weiter nach hinten. Wird das Los schon in der optimalen Lösung früh eingeplant, so sind die Lösungen äquivalent.

Zur Planung wird erneut auf die bestehenden sukzessiven Planungsverfahren zurückgegriffen. Das in 5.2.1.2.1 beschriebene Lot Scheduling wird durch folgende Restriktion ergänzt:

$$f_{s_1} \leq FS \quad (5.129)$$

Dabei wird der Parameter FS auf das Ende der Planungsperiode, den Beginn des Transportzeitfensters oder einen Wert dazwischen gesetzt. Ist die Lösung ungültig, weil diese Restriktion nicht eingehalten werden kann, so wird nur diese Alternative nicht übermittelt. Die gültigen Lösungen werden als Koordinationsangebot durch die Lieferanten übermittelt und durch den Spediteur ausgewählt.

5.3.2.2.2. Auswahl des Koordinationsangebots

Es liegt nun erneut am Spediteur, jeweils eine der offerierten Alternativen zu wählen. Da die Kombinationsmöglichkeiten wiederum sehr groß sind, wird die bereits vorgestellte Tabu-Suche eingesetzt, um eine Auswahl zu treffen. Jede Alternativenzusammenstellung kann durch das in 5.2.1.2.2 vorgestellte VRPTW bewertet werden. Durch die Übermittlung der gewählten Alternativen ist der Prozessschritt abgeschlossen und die Planung für den aktuellen Planungshorizont fixiert.

5.3.2.3. Anmerkungen

Die beschriebene Vorgehensweise nimmt grundsätzliche Kooperationsbereitschaft der Teilnehmer an. Ein opportunistisches Verhalten, bspw. durch Übermittlung überzogener Kompensationskosten, wird ausgeschlossen. Gleichzeitig ist jedoch sichergestellt, dass im Vergleich zur herkömmlichen sukzessiven Planung keine Verschlechterung eintreten kann⁸.

Im Unterschied zum heuristischen Verfahren wird für die dezentrale Koordination ein begrenzter Planungshorizont verwendet. Dies hat zwei Gründe. Zum einen sind zur Vorschlagsgenerierung und -auswahl innerhalb eines Planungshorizonts viele Optimierungsläufe notwendig. Damit die Forderung nach „Lösbarkeit in akzeptabler Zeit“ erfüllt werden kann, wurde so die Anzahl der Planungsperioden reduziert. Dafür wird auch akzeptiert, dass es dadurch zu suboptimalen Lösungen kommen kann.

5.3.3. Technisches Konzept und Modellierung

Zur Umsetzung eines dezentralen Planungsverfahrens bieten sich Multiagenten-Systeme an, wie sie bereits in Kapitel 3.4.1.2.1 vorgestellt wurden. Agenten können nach ihrer internen Architektur in zwei maßgebliche Klassen eingeteilt werden und setzen entweder auf dem BDI⁹-Ansatz auf oder werden als Menge von Zuständen entworfen, die vergleichbar zu einem Automaten gewechselt werden können. Der BDI-Ansatz nimmt an, dass Agenten als Akteure beschrieben werden können, die Annahmen über ihre Umwelt, Ziele und umsetzbare Pläne besitzen. Diese Sichtweise basiert auf dem von Bratman [Bra99]

⁸unter Ausschluss der Transaktionskosten zur Koordination

⁹Belief-Desire-Intention

entworfenen Modell zur menschlichen Entscheidungsfindung. Bei den Untersuchungen zu dieser Arbeit stellte sich heraus, dass der BDI-Ansatz nicht geeignet ist, um Agenten im Supply Chain Management effizient zu modellieren, da sich insbesondere die Zielformulierung und die darauf basierende Planauswahl nicht übertragen lassen, denn Methoden und Ziele der Produktions- und Transportplanung sind statisch. Andererseits sind Kommunikationsaspekte und Verhandlungsstati sehr wichtig, werden jedoch durch das BDI-Modell nur ungenügend unterstützt. Daher wird als technische Basis ein Framework gewählt, das Agenten mittels ihrer Zustände modelliert.

Da mit FRISCO (vgl. 3.4.1.2.2) ein Agentenframework existiert, das speziell für den Einsatz in Supply Chains der Automobilindustrie entworfen wurde, wird es zur Umsetzung genutzt. Im Folgenden werden die relevanten Modellierungskonzepte des Frameworks erläutert.

5.3.3.1. Ontologien

Eine Ontologie ist nach Gruber „an explicit specification of a conceptualization“ [Gru93]. Sie dient in einer heterogenen Systemlandschaft dazu, dass alle Teilnehmer dieselbe Auffassung über die übermittelten Informationen teilen. Es wird also sichergestellt, dass u.a. Stücklisten, Mengen und Zeitinformationen korrekt interpretiert werden. Ontologien bilden die Basis für die Agentenkommunikation. Dafür wurden als maßgebliche und für den Einsatz in Supply Chains der Automobilindustrie relevante Konzepte geschaffen: AdjustmentMeasure, DemandConstraint, Logistics, Negotiation, Resource, Simulation, Sourcing und Time. Bis auf die Konzepte Negotiation, Logistics und Simulation sind diese durch die FRISCO-Entwicklung hervorgebracht worden und können bei Hellingrath et al. [HWBB09] nachgeschlagen werden.

Das Konzept AdjustmentMeasure beschreibt die Maßnahmen, die zur Kapazitätsanpassung getroffen werden können. Von dieser Möglichkeit wird in dieser Arbeit kein Gebrauch gemacht. DemandConstraint beschreibt die Abbildung von Bedarfen auf verfügbare Kapazitäten. Resource enthält Konzepte zur Beschreibung von Fertigungsressourcen und ihrer Kapazitäten. Sourcing erlaubt es, Teile und Produkte zu definieren. Zuletzt gibt es in Time Konzepte zur Definition der Zeit.

Das Konzept *Logistics* formalisiert Transportressourcen und -pläne. Um standortbezogene Informationen abbilden zu können, wurden Geokoordinaten basierend auf Längen-

und Breitengrad integriert. Diese können physischen Standorten, so genannten Supply Chain Entities, zugewiesen werden. Flotten stellen die Zusammenfassung mehrerer Fahrzeuge dar, die wiederum Kapazitätsattribute aufweisen. Ein Tourenplan beschreibt nun die Nutzung dieser Transportressourcen jeweils bezogen auf eine Periode. Dazu wird diesem eine Menge von Touren zugeordnet, die wiederum auf das eingesetzte Fahrzeug und die angefahrenen Haltepunkte, d.h. Supply Chain Entities, referenzieren. Zur Nachverfolgung der Anfahrtsreihenfolge enthalten die Haltepunkte Attribute zur Beschreibung der Position auf der Tour. *Simulation* umfasst eine Menge von Konzepten, die der formalen Spezifikation von Szenarien dienen. *ScenarioSet* umfasst die Menge der Szenarien sowie ein Attribut zur Kennzeichnung des Standardszenarios. *OrganizationalStructure* beschreibt die Netzwerkstruktur, d.h. die Netzwerkteilnehmer und ihre Beziehungen untereinander. In *OperationalStructure* hingegen werden Konzepte für Planung und Ablauf der Simulation hinterlegt. Dies umfasst generelle Informationen, bspw. den Zeithorizont, die Definition der Teile und Produkte einschließlich ihrer Attribute und der Zuordnung zu Lieferanten, Rüst- und Servicezeiten sowie der Auftragsprognosen. Zuletzt werden mittels *Negotiation* die zur Verhandlung benötigten Informationen beschrieben. Der Aufbau orientiert sich an dem der Koordinationsangebote, beschrieben in 5.3.2.1 und 5.3.2.2. Ein *ShippingProposal* besteht aus mehreren *ShippingPlanAlternative*-Objekten, die wiederum mehrere *ShippingOrder*-Objekte bündeln.

5.3.3.2. Workflows

Ein Geschäftsprozess „consists of a collection of activities that are executed in some enterprise or administration according to certain rules and with respect to certain goals“ (vgl. [Kin09]). Eine Instanz eines Geschäftsprozesses wird *Workflow* genannt: „A Workflow is the realization of a business process by some information system“ (vgl. [Kin09]). In diesem Sinne ist die Verwendung des Begriffs „Workflow“ in dieser Arbeit nicht immer konsistent zur Definition, wird aber genutzt, da auch die zugrunde liegenden Softwaresysteme keine strenge Unterscheidung zwischen Prozess und Workflow treffen.

Prozesse können in Agentensystemen genutzt werden, um das Verhalten der Agenten zu definieren. Dies bietet den Vorteil, dass Abläufe, die im Bereich des Supply Chain Managements ohnehin über Prozesse definiert sind, nicht im Programmcode verloren gehen, sondern sich grafisch modellieren lassen. Diese Möglichkeit soll genutzt werden.

Aus Abbildung 5.6 können die notwendigen Planungsprozesse abgeleitet werden. Dies sind die folgenden:

- Lieferanten managen

Der Prozess besteht aus der einzelnen Aktivität „Aktuelle Lieferantenliste melden“. Dies spiegelt die Notwendigkeit wider, dass der Spediteur die aktuellen Lieferanten kennen muss, um den kooperativen Planungsprozess anzustoßen. Da in dieser Arbeit nur die kurzfristige Planung eines statischen Netzwerks betrachtet wird, entfällt dieser Prozess.

- Produktionsprogrammplanung

Der Prozess besteht aus den Aktivitäten „Bruttosekundärbedarfe bestimmen“ und „unverbindlichen Abruf senden“. Er wird täglich durchgeführt. Die Aktivität „Bruttosekundärbedarfe bestimmen“ ist an das Datenobjekt „Primärbedarfe“ gebunden. Deren Ermittlung und Auflösung in Teilebedarfe ist in Abschnitt 5.4 beschrieben. Es schließt sich die Übermittlung an die zuständigen Lieferanten an.

- Lagersteuerung

Der Prozess besteht aus den Aktivitäten „Lagerabruf“, „Material bereitstellen“, „Bestandsinformationen übermitteln“, „Transportdurchführung“ und „Wareneingang registrieren“. Obwohl die letzte Aktivität zu einem anderen Zeitpunkt gestartet wird, wird sie dennoch als dem Prozess zugehörig betrachtet. Der regelmäßig täglich durchgeführte Teilprozess beginnt mit dem Lagerabruf der für diesen Tag benötigten Mengen, die daraufhin bereitgestellt, also dem Lager entnommen werden. Der resultierende Lagerbestand wird den jeweils zuständigen Lieferanten mitgeteilt. Ein im Laufe des Tages eintreffender LKW löst die Aktivität „Wareneingang registrieren“ aus, bei der die eintreffenden Teile ins Lager übernommen werden.

- Abstimmung der Programmplanung

Der Prozess besteht aus den Aktivitäten „Vorschlagsgenerierung Tagesmengen“, „Weitergabe Vorschläge“, „Alternativtourenplanung“ und „Weitergabe gewählter Plan“. Der Prozess wird täglich durchgeführt, sobald die Bedarfe des Abnehmers übermittelt wurden. Basierend auf den Informationsobjekten „vereinbarte Min-/Maxbestände“ und „externe Aufträge“ erfolgt die Generierung mehrerer möglicher Produktionspläne. Diese werden weitergegeben, worauf der Spediteur nach Eintreffen aller Rückmeldungen seine Auswahl trifft und an die Lieferanten zurückgibt.

- Abstimmung der Reihenfolgeplanung

Der Prozess besteht aus den Aktivitäten „Vorschlagsgenerierung Lossequenzen“, „Weitergabe Vorschläge“, „Alternativroutenplanung“, „Weitergabe gewählter Plan“ und „Planübernahme“. Der Prozess wird analog zum vorherigen durchgeführt.

Die Prozess-basierte Modellierung der Abläufe garantiert die Möglichkeit der Einbindung von Domänenexperten und wahrt die Übersichtlichkeit und Wartbarkeit der komplexen Abläufe. Die einzelnen Aktivitäten werden mit Programmcode hinterlegt. Da jeder Prozess sowie jede Aktivität über Ein- und Ausgabeparameter definiert ist, wird die Wiederverwendbarkeit sichergestellt, solange alle Teilnehmer die vereinbarte Ontologie nutzen.

5.4. Herleitung des Verfahrens zur Szenariengenerierung

Da zum einen für das beschriebene Problem keine Daten aus der Praxis verfügbar sind und zum anderen der Ansatz auf sein Potenzial unter verschiedenen Voraussetzungen überprüft werden soll, ist es unumgänglich ein Verfahren zur Szenariengenerierung zu entwerfen. Ziel ist es, die Entitäten und deren Parameter möglichst praxisnah abbilden zu können, d.h. die Daten sollen nicht beliebig randomisiert erzeugt werden, sondern innerhalb gewisser Rahmendaten sinnvoll sein. Unter einem Szenario werden all die Daten verstanden, die zur Ausführung der Modelle notwendig sind. In 5.4.1 werden die dazu anpassbaren Parameter aufgeführt, in 5.4.2 wird beschrieben, wie aus diesen Daten Bedarfe generiert werden, und in 5.4.3 werden Hinweise zur Übermittlung der Informationen gegeben.

Die Erzeugung von Testdaten für Losgrößen- bzw. Tourenplanungsprobleme ist bislang wenig beachtet worden, da zumeist Standarddatensätze¹⁰ für Performancevergleiche genutzt werden. Eine Ausnahme ist der Beitrag von Kimms [Kim99], der eine Methode zur Generierung von MLCLSP-Instanzen vorstellt.

¹⁰Im Internet ist eine Vielzahl von Instanzen frei verfügbar, etwa auf den Seiten des Lehrstuhls für Wirtschaftsinformatik der Fernuni Hagen oder im Transportation Optimization Portal des norwegischen SINTEF.

5.4.1. Rahmendaten

- Allgemein

Zu den allgemeinen Daten gehört die Länge des Planungshorizonts, die zu produzierenden Fahrzeuge pro Periode, die anzustrebende Kapazitätsauslastung der Lieferanten und der Seed¹¹ zur Zufallszahlengenerierung.

- Spediteur

Da eine homogene Fahrzeugflotte angenommen wird, kann einmalig für den Spediteur festgelegt werden, welche Kapazität die LKW in Bezug auf Volumen und Gewicht besitzen. Hinzu kommen die vier Kostenarten Fahrer, Fahrzeug, Kraftstoff und Emissionen. Zuletzt wird der Wert und das Zeitfenster für mögliche Anschlussaufträge festgelegt.

- Routinginformationen

Routinginformationen existieren für jede Relation zwischen zwei Standorten. Sie enthalten die benötigte Fahrzeit und den resultierenden Kraftstoffverbrauch.

- Produkte und Stückliste

Produkte sind über ihre Bedarfe, die als Normalverteilung bestehend aus Mittelwert und Varianz angegeben werden, und ihre Stückliste definiert. Die Normalverteilung wurde gewählt, da die Primärbedarfe die Summe der vielen unabhängigen Einzelentscheidungen der Endkunden darstellen sollen. Für solche Vorgänge kann gemeinhin eine Normalverteilung angenommen werden. Die Stückliste ist eine einfache Mengestückliste, da die Produktstruktur für das betrachtete Planungsproblem irrelevant ist und lediglich die Ableitung der Sekundärbedarfe über die Stückliste erfolgen muss. Einem Produkt ist folglich mindestens ein Teil in einer definierten Anzahl zugewiesen.

- Standorte

Standorte werden unterschieden nach Abnehmer und Lieferant. Zur Darstellung der Standorte in der graphischen Oberfläche werden Koordinaten benötigt. Es werden Längen- und Breitengrade genutzt, um die Positionierung von der verwendeten Karte unabhängig zu machen. Lieferantenstandorte haben zusätzlich Angaben zu den

¹¹Durch die Festlegung eines Seeds zur Zufallszahlengenerierung wird diese deterministisch und somit reproduzierbar, sodass gleiche Szenarienparameter immer dieselben Bedarfe erzeugen.

anfallenden Opportunitätskosten bei Rüstvorgängen und der Servicezeit zur Beladung eintreffender LKW.

- Teile

Teile werden unterschieden nach internen und externen Teilen. Da externe Teile lediglich produziert und nicht transportiert oder gelagert werden müssen, werden sie allein durch die Fertigungszeit, den Lieferanten und die Rüstkosten beschrieben. Da die Rüstkosten sequenzabhängig sind, müssen sie zwischen allen definierten Teilen bestimmt sein. Um eine automatisierte Bestimmung der Rüstkosten zu ermöglichen, die der Dreiecksungleichung genügen, wird jedem Teil eine Position in einem Quadrat zugewiesen (Rüst-Positionen A und B). Die Diagonale beschränkt die maximale Rüstzeit. Interne Teile benötigen zusätzlich Angaben über Volumen und Gewicht für die Transportplanung sowie Mindest- und Maximalbestände und Lagerhaltungskosten für die Mengenplanung.

5.4.2. Erzeugung

Die Erzeugung der Sekundärbedarfe nach Algorithmus 1 gliedert sich in zwei Abschnitte: der Primärbedarfsgenerierung in den Zeilen 1-14 und der Auffüllung mit externen Bedarfen in den Zeilen 15-26. Bei der Primärbedarfsgenerierung wird zunächst eine zufällige Menge entsprechend der Normalverteilung jedem Produkt zugewiesen (Z. 3). Anschließend wird sichergestellt, dass die Gesamtmenge pro Periode der definierten Fahrzeugmenge entspricht (Z. 5), wozu die Mengen zufälliger Produkte solange vergrößert oder verringert werden, bis die Summe stimmt (Z. 8 bzw. 11). Über die Primärbedarfe und die dazugehörigen Stücklisten können die Sekundärbedarfe abgeleitet werden (Z. 15). Da dies bei den hier verwendeten einstufigen Stücklisten trivial ist, wird die Funktion nicht definiert. Anschließend ist die Kapazitätsauslastung jedes Lieferanten in jeder Periode über die Funktion $Auslastung(Lieferant, Periode)$ bekannt. Diese Funktion bildet die Summe $Auslastung(l, t) = \sum_p^P Bedarf(l, t, p) \cdot Produktionszeit(p) + Ruestindikator(p) \cdot Ruestzeit(p)$. Die Auslastungen werden nun mit der Sollauslastung abgeglichen und bei Abweichungen größer einer gewissen Toleranz werden externe Bedarfe hinzugefügt oder entfernt, sodass die gewünschte Sollauslastung erreicht wird. Die Toleranz wurde eingefügt, um die Lösbarkeit dieser Aufgabe zu garantieren, da die gewünschte Sollauslastung mit großer Wahrscheinlichkeit nicht exakt erzielt werden kann.

5.4.3. Datenformat

Die beiden vorgestellten Lösungsverfahren unterscheiden sich grundlegend voneinander. Die Agentenplattform JADE erfordert, dass Ontologien zur Wissensrepräsentation genutzt werden. Ohne eine einheitliche Ontologie können die Agenten untereinander nicht kommunizieren. Daher wurden die Konzepte einer Supply Chain der Automobilindustrie formalisiert. Dem entgegen steht das heuristische Verfahren, das auf einer mathematischen Modellierung beruht. Aus diesem Grund wurde ein spezifisches XML-Schema zur Speicherung der Szenarien erstellt. Dieses können beide Verfahren importieren und in die eigene interne Datenhaltung überführen. Das dazugehörige XML-Format ist im Anhang B mittels des zugehörigen XML Schemes (XSD) beschrieben.

Zu beachten ist, dass Fertigungszeiten für Teile hinterlegt sind und damit unabhängig vom Lieferanten sind. Diese Annahme ist gedeckt durch die Annahme, dass Teile im Single Sourcing bezogen werden. Entsprechend sind die Rüstzeiten gemeinsam definiert.

Algorithmus 1 Bedarfsgenerierung

```

1: for  $t = 1$  to Planunghorizont do
2:   for all  $p \in$  Produkte do
3:      $\text{Primaerbedarf}[p, t] \leftarrow \text{Random}(NV(\mu[p]; \sigma[p]))$ 
4:   end for
5:   while  $\sum_p^P \text{Primaerbedarf}[p, t] \neq$  Fahrzeuge pro Periode do
6:     if  $\sum_p^P \text{Primaerbedarf}[p, t] >$  Fahrzeuge pro Periode then
7:       if  $\text{Primaerbedarf}[\text{Random}(p), t] > 0$  then
8:          $\text{Primaerbedarf}[\text{Random}(p), t] \leftarrow \text{Primaerbedarf}[\text{Random}(p), t] - 1$ 
9:       end if
10:      else
11:         $\text{Primaerbedarf}[\text{Random}(p), t] \leftarrow \text{Primaerbedarf}[\text{Random}(p), t] + 1$ 
12:      end if
13:    end while
14:  end for
15:  Leite  $\text{Bedarf}[\text{Lieferant}, \text{Periode}, \text{Teil}]$  aus Primärbedarfen und Stücklisten ab
16:  for all  $l \in$  Lieferanten do
17:    for  $t = 1$  to Planunghorizont do
18:      while  $|\text{Auslastung}[l, t] - \text{Sollauslastung}| >$  Toleranz do
19:        if  $\text{Auslastung}[l, t] >$   $\text{Sollauslastung} + \text{Toleranz}$  then
20:           $\text{Bedarf}[l, t, \text{Random}(ex. \text{Teil})] \leftarrow \text{Bedarf}[l, t, \text{Random}(ex. \text{Teil})] - 1$ 
21:        else
22:           $\text{Bedarf}[l, t, \text{Random}(ex. \text{Teil})] \leftarrow \text{Bedarf}[l, t, \text{Random}(ex. \text{Teil})] + 1$ 
23:        end if
24:      end while
25:    end for
26:  end for

```

6. Implementation der Lösungskonzepte

Nachdem in Kapitel 5 die Verfahren zur Lösung des in Kapitel 2 definierten Problems theoretisch hergeleitet wurden, kann nun ihre praktische Umsetzung betrieben werden. Entsprechend der Vorarbeiten sind dies zwei Verfahren: eines, um das Potenzial bei voller Kooperation zu quantifizieren, und eines, um das Potenzial unter realitätsnahen Bedingungen zu nutzen.

6.1. Heuristik zur Bestimmung des theoretischen Optimums

Es wurde bereits vermutet, dass das integrierte mathematische Optimierungsmodell sehr hohe Laufzeiten aufweisen wird, da es zwei NP-schwere Teilmodelle enthält und die Komplexität durch die Kopplung weiter zunimmt. Die Testläufe wurden auf einem Intel Core 2 Quad-Rechner (2,66 GHz) mit 4 GB Arbeitsspeicher durchgeführt und in Tabelle 6.1 dokumentiert. Es ist zu sehen, dass selbst kleine Probleme hohe Laufzeiten aufweisen und Modelle in praxisrelevanter Größenordnung, in diesem Falle 64 Mikroperioden, was einer Auflösung von 15 Minuten für einen Arbeitstag von 16 Stunden entspricht, nicht mehr lösbar sind. Die dargestellten Testläufe enthielten jeweils nur ein Fahrzeug und Speicher- und Rechenbedarf steigen mit zusätzlichen Fahrzeugen stark an. Die Notwendigkeit zur Implementierung einer Heuristik wird hier also deutlich. Selbst auf einem Rechner mit 24 Kernen und 128 GB Arbeitsspeicher lässt sich ein Beispiel annähernd relevanter Größenordnung nicht in Laufzeiten kleiner 30 Minuten durchführen.

Knoten	Mikroperioden	Produkte	Gap	Laufzeit
4	10	2	10^{-4}	3 sec.
4	10	2	$5 \cdot 10^{-2}$	3 sec.
5	10	6	10^{-4}	nicht lösbar wg. Speichermangel
5	10	6	$5 \cdot 10^{-2}$	42 sec.
5	64	6	$5 \cdot 10^{-2}$	nicht lösbar wg. Speichermangel

Tabelle 6.1.: Laufzeiten des IVRLSP-Modells

6.1.1. Architektur und Datenmodell

Die Architektur der Software zur heuristischen Lösung ist relativ simpel und umfasst neben der zentralen Klasse `Planner` lediglich jeweils eine Klasse für die verschiedenen Datenquellen der Optimierungsmodelle, eine Klasse für die Datengenerierung und die Im- und Export-Klassen neben wenigen Hilfsklassen. Hinzu kommt das Datenmodell (vgl. UML-Klassendiagramm in Abb. 6.1), welches sich an den in 5.3.3.1 vorgestellten Konzepten orientiert, sie jedoch in dem Planungsproblem in angemessener Weise vereinfacht. Die in der Klasse `Planner` verwendeten Algorithmen zum Durchlaufen der Optimierungsmodelle und der Verwaltung ihrer Ein- und Ausgabedaten werden in 6.1.3 vorgestellt; ihre Einbindung in den Java-Programmcode wird zuvor in 6.1.2 erläutert.

6.1.2. Einbindung der mathematischen Modelle

Die mathematischen Modelle wurden in der Sprache OPL formalisiert (vgl. Anhang A) und mittels der von ILOG als JAR-Bibliothek bereitgestellten OPL Interfaces in den Java-Programmcode eingebunden. Das OPL Interface sorgt ebenfalls für die Einbindung des CPLEX-Solvers.

Die Datenbereitstellung erfolgt über Custom Data Sources (vgl. [ILO09, S. 47ff.]), welche benutzerimplementierte Ableitungen der Klasse `ilog.opl.IloCustomOplDataSource` darstellen, die die Methode `public void customRead()` definieren müssen. Nach der Initialisierung des Handlerobjekts durch die Zuweisung `IloOplDataHandler handler = getDataHandler();` können die Modelldaten übergeben werden. Dazu wird ein Parameter `X` mittels `handler.startElement("X")` begonnen. Handelt es sich um ein ein- oder mehrdimensionales Array, so werden die Datenreihen durch `handler.startArray()` bzw. `handler.endArray()` eingeschlossen. Eigentliche Daten werden über `handler.addInt`

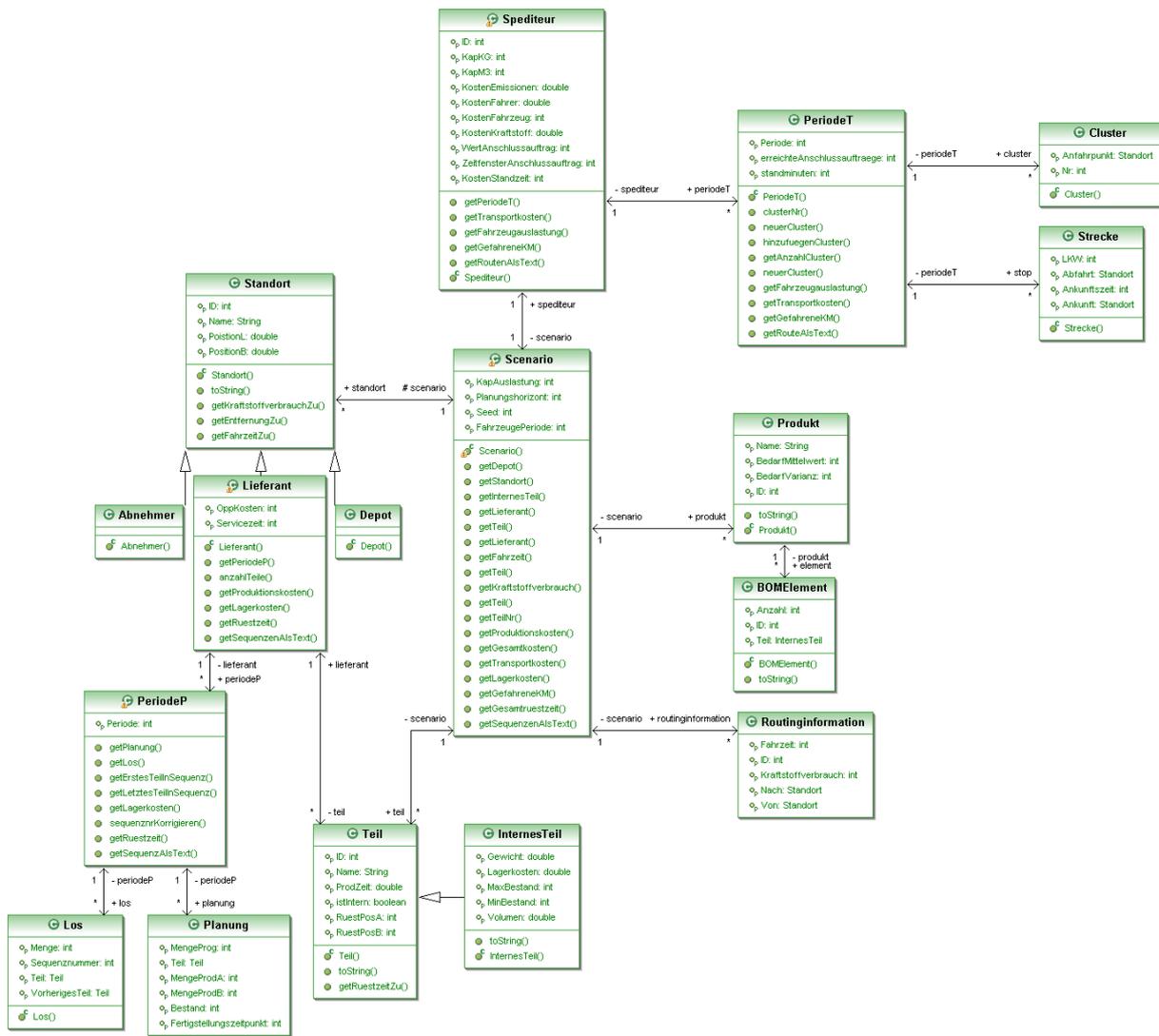


Abbildung 6.1.: Klassendiagramm des Datenmodells der Heuristik

Item() für ganzzahlige oder binäre Werte und handler.addNumItem() für rationale Werte übergeben.

Diese Vorgehensweise hat gegenüber dem zeilenweisen Aufbau als LP-Modell mehrere Vorteile. Zum einen sinkt die Fehlerquote in der Implementierung, da eine größere Übersicht im Programmcode hergestellt werden kann und die Ausgabe der eingelesenen Daten im formatierten .dat-Format möglich ist. Außerdem ist der Datenparser in der Lage, auf fehlende oder fehlerhafte Daten hinzuweisen. Es wurde außerdem die Möglichkeit der Warmstarts genutzt. Dazu wird die Lösung des überperiodischen Modells bzw. des innerperiodischen Modells jeweils pro Periode und Cluster gespeichert und vor dem nächsten Lauf wieder eingelesen. Dies verkürzt die Laufzeit erheblich.

6.1.3. Algorithmen

Die im vorangegangenen Kapitel vorgestellten mathematischen Modelle lösen zwar wie beschrieben die einzelnen Teilplanungsprobleme, allerdings wurde bislang ihre Anwendung, Kombination und letztlich die Datenweitergabe zwischen ihnen noch nicht betrachtet. Für die eigentliche Planung sind die Modelle in Algorithmen eingebunden, die den Ablauf und die Datenverwaltung übernehmen.

6.1.3.1. Überperiodische Produktionsplanung ohne Transporte (CLSP-T)

Für die überperiodische Planung ohne Transporte, also des Grobplanungsschritts des Lieferanten in der Sukzessivplanung, wird das in 5.2.1.1 vorgestellte CLSP-T verwendet. Da die Laufzeiten auch für große Instanzen gering sind, wird es für jeden Lieferanten einzeln, jedoch jeweils für den gesamten Planungshorizont, ausgeführt (vgl. Alg. 2). Dazu müssen die Parameter für das Modell durch die Custom Data Source aufbereitet und die Ergebnisse ausgelesen werden. Die im Algorithmus verwendete Variable `Lieferanten` bezeichnet eine Menge von Objekten des Typs `Lieferant` wie er im Datenmodell der Heuristik spezifiziert wurde. Darüber können die Produktionsperioden in Objekten des Type `PeriodeP` referenziert werden und darüber auch die prognostizierten Mengen, die in der Variable `MengeProg` für jedes Teil in einen Objekt des Typs `Planung` hinterlegt sind. Jeder Lieferant besitzt außerdem eine Referenz zur Menge der Teile, die über Objekte des Typen `Teil` bzw. als Spezifizierung `InternesTeil` definiert sind. Darüber lassen sich die Angaben zu Produktions- und Rüstzeiten sowie Bestandsvereinbarungen auslesen. All dies geschieht in der Klasse `DataSourceCLSPT`.

Algorithmus 2 Losgrößenplanung

```
1: for all s ∈ Lieferanten do  
2:   optimiereLosgrößen(s)  
3: end for
```

6.1.3.2. Überperiodische Produktionsplanung mit Tourenzuweisung (CLSP-TC)

Für die überperiodische Planung mit Tourenzuweisung gilt entsprechendes wie für die überperiodische Planung ohne Transportberücksichtigung. Allerdings wird dieses Modell

für alle Lieferanten gemeinsam durchgeführt, da es bereits an dieser Stelle zu Abhängigkeiten bezüglich der Liefermengen und der daraus folgenden Transporte kommt. Gleichzeitig ist jedoch die Anzahl der benötigten Fahrzeuge um alle bereitgestellten Waren transportieren zu können vorab nicht bekannt. Nun könnte die Anzahl der verfügbaren Fahrzeuge auf einen ausreichend hohen Wert festgelegt werden, allerdings steigt damit auch die Laufzeit des Optimierers stark an. Aus diesem Grund startet die Lösungsfindung mit zunächst nur einem verfügbaren Fahrzeug und erhöht die Anzahl solange, bis eine gültige Lösung gefunden werden kann. Auf Grund der Optimalität des Lösungsverfahrens ist dies die minimale Anzahl benötigter Fahrzeuge (vgl. Alg. 3). Zusammengehörige Cluster werden in `Cluster`-Objekten gespeichert, die von der jeweils betreffenden Transportperiode vom Typ `PeriodeT` referenziert werden. Ein Clusterobjekt enthält zwei Variablen, `Anfahrpunkt` für den Lieferanten und `Nr` für die zugehörige Tour. Es ist zu beachten, dass ein Cluster auch nur einen einzelnen Lieferanten enthalten kann.

Algorithmus 3 Losgrößenplanung mit Tourenzuweisung

```
1: lkw ← 1
2: while ¬ optimiereLosgrößenUndTouren(Lieferanten, Spediteur, lkw) do
3:   lkw ← lkw + 1
4: end while
```

6.1.3.3. Innerperiodische Sequenzierung und Routenplanung (LS/VRPTW)

Die innerperiodische Sukzessivplanung besteht aus zwei Modellen. Erst nachdem die Produktionsreihenfolge mittels des LS-Modells bestimmt und daraus die Transportzeitfenster bestimmt wurden, können mit Hilfe des VRPTW die Routen errechnet werden. Es ist zu beachten, dass es durch die Trennung des über- und innerperiodischen Zeithorizonts dazu kommen kann, dass die als überperiodisch optimal ermittelte Lösung nicht den optimalen Input für das innerperiodische Modell darstellt. Aus diesem Grund werden die innerperiodischen Modelle mehrfach ausgeführt, dabei werden die optimale Lösung des überperiodischen Modells sowie alle gültigen Lösungen, deren Zielfunktionswert nicht mehr als 3% vom optimalen Wert abweichen, als Input übergeben. Algorithmus 4 beschreibt den Ablauf der Planung für alle Perioden bei allen Lieferanten. Es ist zu beachten, dass der Rüstzustand fortgeschrieben werden muss, um die korrekten Rüstvorgänge periodenübergreifend darzustellen. Die Angaben zu den zu sequenzierenden Losen wurden vorab bestimmt und im jeweiligen Planungsobjekt des Teils innerhalb der Produktionsperiode

des betreffenden Lieferanten in der Variablen `MengeProd` hinterlegt. Die resultierende Sequenz wird in Objekten des Typs `Los` hinterlegt, die jeweils eine Variable `Sequenznummer` besitzen. Die Menge der Lose wird durch die jeweilige Produktionsperiode referenziert.

Algorithmus 4 Periodenweises Lot Sequencing

```

1: besteLösung ← 0
2: for all gültige CLSP-T-Lösungen n innerhalb 3% Toleranz des Optimalwerts do
3:   for all s ∈ Lieferanten do
4:     rüztzustand ← null
5:     for all t ∈ (Perioden ∈ s) do
6:       rüestzustand ← optimiereSequenz(s, t, rüztzustand)
7:     end for
8:   end for
9:   if ermittleProduktionskosten(n) < ermittleProduktionskosten(besteLösung) then
10:    besteLösung ← n
11:   end if
12: end for speichereLösung(besteLösung)

```

Da das VRPTW schon für eine geringe Anzahl von Knoten sehr komplex wird, wird vor der Routenplanung eine Tourenplanung durchgeführt, sodass die Routenplanung jeweils nur auf wenigen Knoten, die von einem LKW bedient werden, durchgeführt werden muss. Aus der Anzahl der Touren ergibt sich demnach gleichzeitig die Zahl der benötigten LKW. Anhang A.4 zeigt das verwendete mathematische Modell. Das Vorgehen wird in Algorithmus 5 gezeigt. Die zu transportierenden Teile sowie deren Eigenschaften können über die `Lieferant`-Objekte abgefragt werden. Für die entstehenden Routen werden Objekte des Typs `Strecke` erstellt, die für jeden LKW die gefahrenen Strecken abbilden. Sie werden durch die Transportperiode referenziert.

Algorithmus 5 Tourenplanung mit Zeitfenstern

```

1: for all t ∈ Perioden do
2:   lkw ← 1
3:   while ¬ optimiereRoute(Spediteur, Lieferanten, t, lkw) do
4:     lkw ← lkw + 1
5:   end while
6: end for

```

6.1.3.4. Innerperiodische integrierte Planung von Produktion und Transport (IVRLS)

Die integrierte innerperiodische Planung besteht lediglich aus einem Modell, das Sequenzierung und Routing umfasst. Um den Problemraum möglichst klein zu halten, wurde bereits im vorgelagerten Optimierungsschritt eine Einteilung in Cluster bzw. Touren vorgenommen, die sich an den zu transportierenden Mengen und der zu fahrenden Strecken orientieren. Das IVRLS kann demnach clusterweise durchgeführt werden, weil zwischen Lieferanten verschiedener Cluster keine Abhängigkeiten bestehen. Damit wird der Rechenaufwand deutlich reduziert. Allerdings müssen die Ankunftszeiten der LKW beim Abnehmer zwischen den Touren weitergegeben werden, damit diese bei der Optimierung berücksichtigt werden können. Wie bei der lieferantenweisen Sequenzierung muss außerdem der Rüstzustand fortgeschrieben werden. Sollte ein Lieferant in einer Periode nur interne Teile fertigen, so befindet er sich auf keiner Tour und die Sequenzbildung muss gesondert über das LS-Modell erfolgen. Zuletzt gilt hier auch wie bei der Sukzessivplanung, dass durch den Bruch zwischen über- und innerperiodischer Optimierung eine auf der höheren Ebene suboptimale Lösung den optimalen Input in Bezug auf das Gesamtergebnis darstellt. Daher wird das Modell mit allen Lösungen innerhalb einer 3%-Toleranz durchlaufen (vgl. Algorithmus 6).

6.1.4. Graphische Benutzerschnittstelle

Die Oberfläche des Optimierungsprogramms (vgl. Abb. 6.2) teilt sich in elf Reiter auf, die jeweils eine Seite mit Einstellungsmöglichkeiten präsentieren. Zudem können über das Menü „Datei“ Szenarien geladen und gespeichert werden, über das Menü „Szenario“ Daten des Szenarios erstellt, verwaltet und visualisiert werden und über das Menü „Optimierung“ die sukzessive und integrierte Optimierung durchgeführt werden. Das Erstellen von Daten im „Szenario“-Menü umfasst randomisierte Rüstzeiten und Standorte sowie das automatisierte Ableiten von Fahrzeiten aus Entfernungen und des Kraftstoffverbrauchs aus der Fahrzeit. Zudem können die Sekundärbedarfe aus dem Primärbedarf abgeleitet werden. Die Verwaltung betrifft das Löschen der Sekundärbedarfe und die Visualisierung das Anzeigen der Standorte und der Entfernungen zwischen ihnen. Nachfolgend werden die einzelnen Sichten beschrieben.

Algorithmus 6 Perioden- und tourenweise Lossequenzierung mit integrierter Routenplanung

```

1: besteLösung ← 0
2: for all gültige CLSP-TC-Lösungen n innerhalb 3% Toleranz des Optimalwerts do
3:   rüszustände ← {null}
4:   for all t ∈ Perioden do
5:     ankuftszeiten ← {null}
6:     for all c ∈ Touren do
7:       rüszustände, ankuftszeiten ← optimiereSequenzenUndRouten(t, c, rüszu-
         stände, ankuftszeiten)
8:     end for
9:     for all l ∈ c do
10:      rüszstände ← optimiereSequenz(l, t, rüszustände)
11:    end for
12:    end for
13:    if ermittelteGesamtkosten(n) < ermittelteGesamtkosten(besteLösung) then
14:      besteLösung ← n
15:    end if
16:  end for
17: speichereLösung(besteLösung)

```

- Basisdaten

Diese Sicht erlaubt das Einstellen des Planungshorizonts, der Position des Abnehmers, der gefertigten Fahrzeuge pro Periode und die anzustrebende Kapazitätsauslastung der Lieferanten. Außerdem wird ein Seed-Wert definiert, der bei allen randomisierten Vorgängen genutzt wird, um deterministische Zufallszahlen zu erhalten.

- Produkte

Diese Sicht erlaubt es, Produkte des OEM zu definieren, samt ihres Primärbedarfs, ausgedrückt durch Mittelwert und Varianz, sowie ihrer Stückliste.

- Lieferanten

Diese Sicht umfasst alle Daten zu Lieferanten, d.h. deren geographischer Position, der Opportunitätskosten und der Servicezeit bei der Abholung.

- Teile

Diese Sicht verwaltet alle Informationen zu Teilen, die in einer Stückliste referenziert werden. Dies umfasst Produktionszeit, Lagerhaltungskosten, Volumen, Gewicht, Mindest- und Maximalbestand sowie des zuständigen Lieferanten.

- Externe Teile

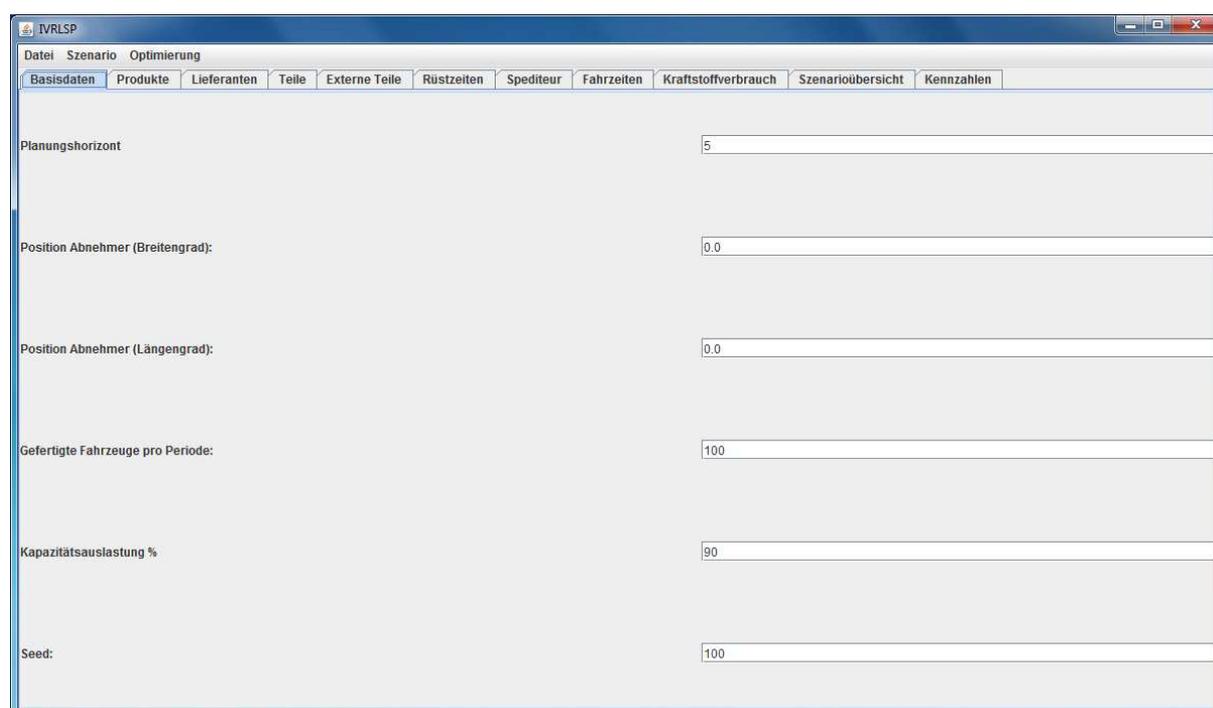


Abbildung 6.2.: Die Benutzerschnittstelle des IVRLSP-Optimierungsprogramms

Diese Sicht verwaltet alle Informationen zu Teilen, die nicht in ein Produkt des Abnehmers eingehen. Für sie wird lediglich die Produktionszeit und der betreffende Lieferant festgelegt.

- Rüstzeiten

Diese Sicht erlaubt es, Teilen eine Position innerhalb einer rechteckigen Rüstmatrix zuzuweisen. Auf diese Weise können die reihenfolgeabhängigen Rüstzeiten abgeleitet werden und müssen nicht für jede Kombination aus zwei Teilen spezifiziert werden.

- Spediteur

Diese Sicht umfasst alle relevanten Daten zum Transport, welche neben dem Standort des Depots die Fahrzeugkapazität in Volumen und Gewicht, die verschiedenen Kostenkomponenten der Transportdurchführung, das Zeitfenster für Anschlussaufträge, der Wert eines Anschlussauftrags und die Kosten für Standzeit sind.

- Fahrzeiten

Diese Sicht zeigt eine Tabelle mit den Fahrzeiten zwischen allen Standorten.

- Kraftstoffverbrauch

Diese Sicht zeigt eine Tabelle mit dem Kraftstoffverbrauch zwischen allen Stand-

orten.

- Szenarioübersicht

Um das erstellte Szenario und die erfolgte Optimierung besser überblicken zu können, sind in dieser Sicht verschiedene Visualisierungen zusammengefasst. Diese sind: Gegenüberstellung von Prognosen und Losen (vgl. Abb. 6.3), Lossequenzen, Routen, Lagerbeständen, Standorten und Rüstzeiten.

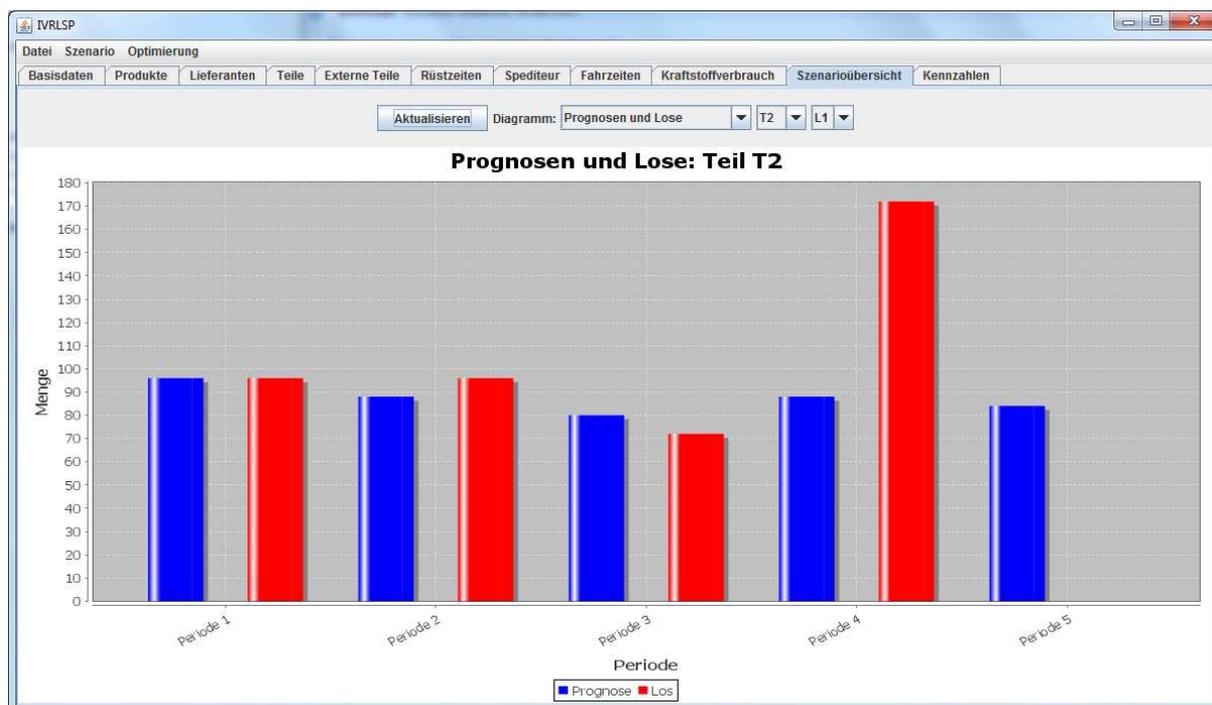


Abbildung 6.3.: Visualisierung von Prognosen und Losen

- Kennzahlen

Diese Sicht bietet einen schnellen Überblick über die Kennzahlen Gesamtkosten, Produktions-, Lagerhaltungs- und Transportkosten, Gesamtrüstzeit und gefahrene Kilometer.

6.2. Multiagentensystem zur praxisorientierten kooperativen Planung

Als Basis des zu implementierenden Multiagentensystems wurde das in 3.4.1.2.2 bereits erwähnte Framework FRISCO gewählt, da es speziell für den Einsatz in Supply Chains

ausgelegt ist. Es basiert auf der Agenten-Plattform JADE, die nach dem in 5.3.3 beschriebenen automatenähnlichen Ansatz aufgebaut ist. Daher führen die Agenten keine wissensbasierte Auswertung ihrer Umwelt und der möglichen Aktionen zur Einflussnahme darauf aus, sondern werden mittels definierter Abläufe in verschiedene Zustände versetzt. Für diese Steuerung werden Workflows verwendet, die die Prozessabläufe definieren. In den jeweiligen Aktivitäten sind die passenden Planungs- und Kommunikationsverfahren beschrieben. Besonders die Abbildung der inner- und überbetrieblichen Problemlösung mittels Workflows entspricht dem Vorgehen in der Praxis, sodass sich bisherige Erkenntnisse leichter übertragen lassen als beispielsweise auf eine Blackboard-Architektur (vgl. 3.4.2.1).

6.2.1. Architektur des Multiagentensystems

In Abbildung 6.4 ist die Vererbungsstruktur der Agenten dargestellt. Die Oberklasse `FriscoAgent` ist eine Spezialisierung der WADE-Agentenklasse `WorkflowEngineAgent`, die wiederum auf dem Standard-JADE-Agenten `Agent` basiert. Die Erweiterungen an dieser Stelle betreffen vor allem die von allen Agenten genutzte „Message“-Ansicht sowie Methoden zur Anpassung von Workflows. Auch der Agent zur Simulationssteuerung basiert auf dieser Klasse; in der Abbildung wird er ausgelassen. Ausgehend von der grundlegenden FRISCO-Erweiterung wird der Agent `FriscoSCPartner` abgeleitet. Dieser stellt die Basis für alle Agenten dar, die eine Planungsentität in der Supply Chain repräsentieren. Die Erweiterung betrifft daher die Einführung von Geokoordinaten und eines Modells zur Verwaltung der Geschäftsbeziehungen. Nachfolgend wird zwischen `AgentFriscoLogistics` und `AgentFriscoManufacturing` unterschieden, da diese jeweils andere Anforderungen an Datenmodelle und Methoden haben. Der Produktionsagent wird wiederum in OEM (`AgentFriscoOEM`) und Lieferant (`AgentFriscoSupplier`) unterschieden. Von diesen drei Standardklassen werden die projektspezifischen Agenten abgeleitet.

6.2.2. Ablaufsteuerung durch Workflows

Die Abläufe in rein JADE-basierten Agenten werden nicht über Workflows gesteuert. Vielmehr bestehen sie aus einer Menge von „Behaviours“, nebenläufigen Methoden für bestimmte Aufgaben, die sich gegenseitig auslösen können (vgl. [FB07, S. 57ff.]). Somit sind jedoch die Abläufe innerhalb des Programmcodes festgelegt. Die Erweiterung WADE

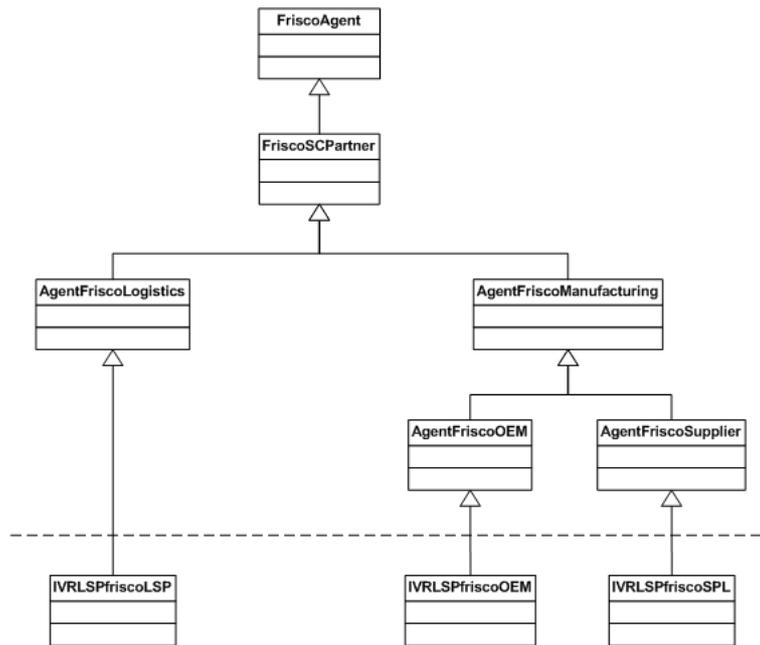


Abbildung 6.4.: Vererbungsstruktur der Agenten

(Workflows and Agents Development Environment)¹ bzw. das Eclipse-Plugin WOLF erlauben es hingegen, Abläufe graphisch als Aktivitätendiagramme zu modellieren, wobei Aktivitäten und Ablaufkontrollstrukturen unterstützt und in Code übersetzt werden. Die Methoden und die Ausführungsumgebung für Workflows werden durch die Agentenklasse `WorkflowEngineAgent` bereitgestellt.

6.2.2.1. Interne Workflows

Als interne Workflows werden solche Workflows bezeichnet, die von einem Teilnehmer intern durchgeführt werden und keiner Abstimmung bzw. Kommunikation mit einem Partner bedürfen. Sie werden zur Ablaufsteuerung genutzt, die sich statt an kodierten Abläufen an grafisch modellierten Workflows orientiert und somit eine leichte Übertragung von Geschäftsprozessen auf das auszuführende Agentensystem erlaubt. Da auch Prozesse schützenswertes Know-how enthalten können, werden diese üblicherweise nicht ausgetauscht oder in eine Bibliothek eingebracht.

¹<http://jade.tilab.com/wade/index.html>

6.2.2.2. Externe Workflows

Als externe Workflows werden solche Workflows bezeichnet, die bei zwei Partnern simultan ablaufen und Kommunikation beinhalten. Externe Workflows werden nach dem in Abbildung 6.5 gezeigten Muster aufgebaut. Dabei wird ein gemeinsamer Workflow modelliert, der zwei Pfade jeweils für den Aufrufenden und den Aufgerufenen enthält, die nach einer Fallunterscheidung durchlaufen werden. Der Aufruf des Workflows erfolgt im Falle des Aufrufenden durch einen anderen Workflow oder durch einen periodengesteuerten Dispatcher. Im Falle des Aufgerufenen ist ein Hilfskonstrukt notwendig, da Workflows nicht direkt durch JADE auf Grund einer eintreffenden Nachricht gestartet werden können. Es ist dazu ein Dispatcher notwendig, der solche Nachrichtentypen entgegennimmt wie sie für den Workflow bestimmt sind und dann intern den Workflow auslöst. Jeder externe Workflow besitzt zwei Parameter, die gesetzt werden müssen, bevor er ausgeführt werden kann. Dies sind `WorkflowExecuterMode` und `ACLMessage`. Dies übernimmt im zuletzt geschilderten Fall der Dispatcher, der den Modus auf `CALLEE` setzt und den Inhalt der empfangenen Nachricht weiterreicht. Im anderen Falle wird der Modus auf `CALLER` gesetzt; als Nachricht wird eine `null`-Referenz übergeben, da diese in diesem Fall nicht benötigt wird.

Da externe Workflows zwischen den Beteiligten offen gelegt werden, können dort im Gegensatz zu internen Workflows keine Abläufe definiert werden, die einen Wettbewerbsvorteil darstellen könnten. Mittels Subworkflows und zugehöriger Input- und Outputparameter ist es möglich, interne Vorgänge zu abstrahieren und die im Prozess notwendigen Daten auf die auszutauschenden einzuschränken.

6.2.3. Abbildung des VMI-Prozesses auf Workflows

Abbildung 6.6 zeigt, welche Prozessschritte des kooperativen VMI-Prozesses durch welche Workflows repräsentiert werden. Dabei kann auf Grund der sehr ähnlichen Modellierungsmethoden eine nahezu direkte Übertragung erfolgen, die sich allerdings im Detaillierungsgrad unterscheidet. Ein wichtiger Unterschied zwischen dem Geschäftsprozess und der entsprechenden Implementierung ist, dass beim Multiagentensystem die tägliche Planung vom Spediteur und nicht von den Lieferanten angestoßen wird. Der Grund ist, dass die technische Umsetzung um ein Vielfaches einfacher ist, wenn ein Teilnehmer mehrere An-

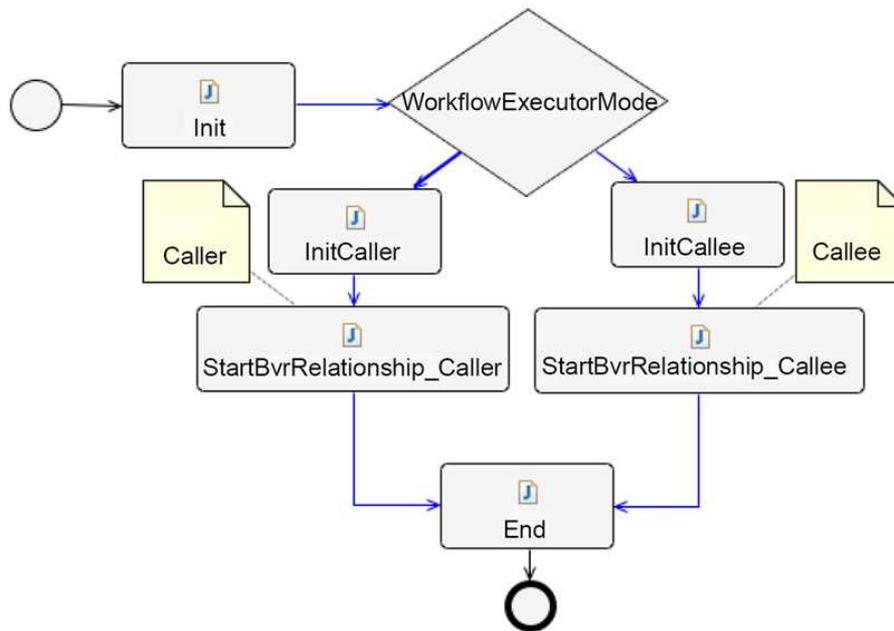


Abbildung 6.5.: Aufbau externer Workflows

fragen abschickt und empfängt als wenn viele Teilnehmer Anfragen an einen Teilnehmer senden.

6.2.3.1. OEMPlanning

Der Workflow `OEMPlanning` (vgl. Abbildung 6.7) besteht aus den drei Subworkflows `CalculatePartRequest`, `NoncommittalForecast` und `Production`. Diese werden im Folgenden eigenständig erläutert.

6.2.3.2. CalculatePartRequest

Der Workflow `CalculatePartRequest`, dargestellt in Abbildung 6.8, ist ein durch den Workflow `OEMPlanning` referenzierter Workflow, dessen Aufgabe es ist, aus den bestehenden Primärbedarfen die Sekundärbedarfe an zugelieferten Teilen zu bestimmen. Dazu werden drei Aktivitäten durchlaufen. In `DerivePtsAndQty` wird abgefragt, welche Produkte in welcher Menge in der betreffenden Periode gefertigt werden sollen. Der anschließende Schritt `CalculatePartRequest` durchläuft die passenden Stücklisten und erstellt so eine Aufstellung der Mengen benötigter Teile. Zuletzt wird diese in `UpdateLocalModel` im Agenten gespeichert.

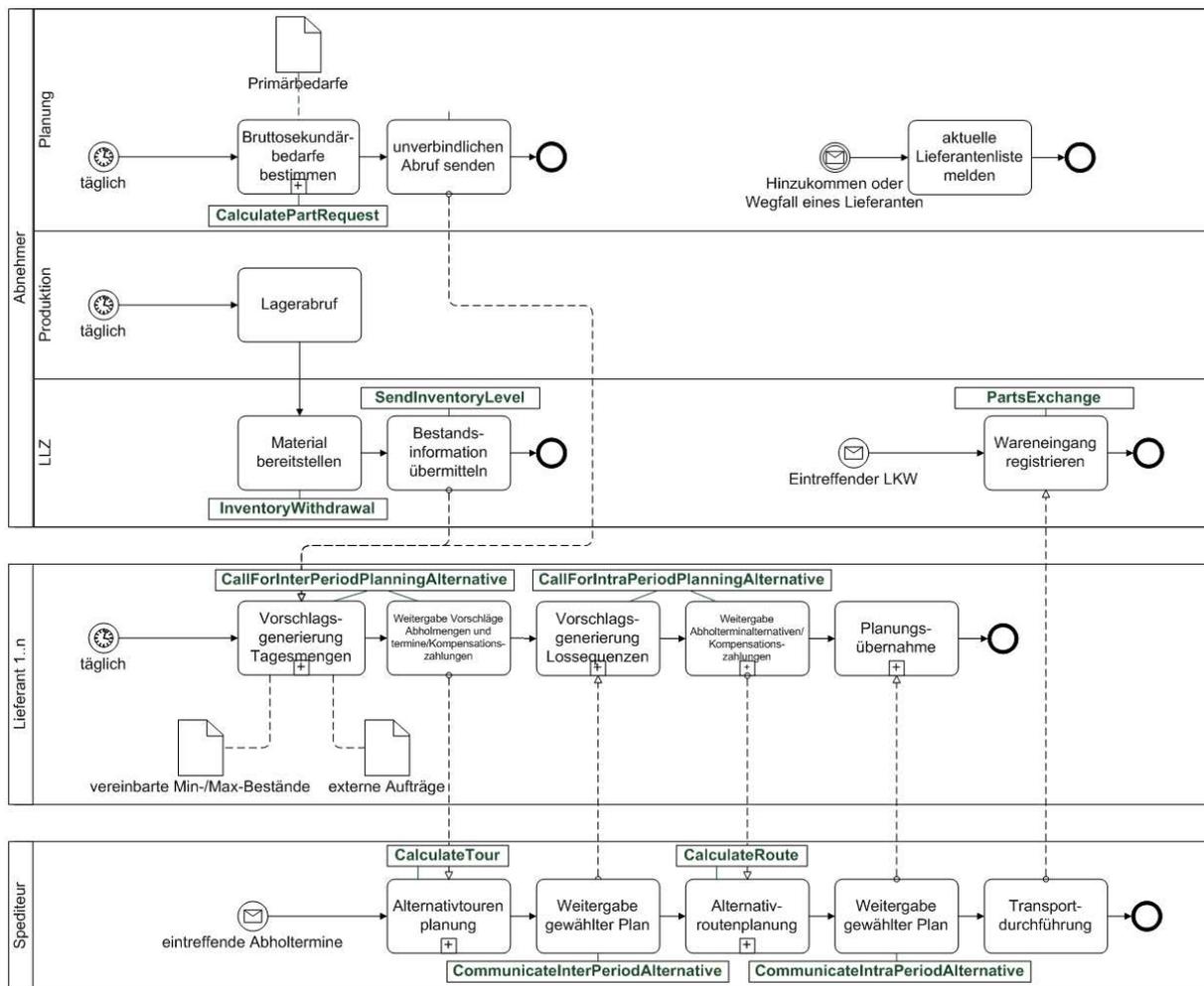


Abbildung 6.6.: Mapping der Workflows auf den koordinierten VMI-Prozess

6.2.3.3. NoncommittalForecast

Der Workflow `NoncommittalForecast` (vgl. Abbildung 6.9) ist ein externer Workflow, der durchgeführt wird, nachdem die aktuellen Teilebedarfe bestimmt wurden. Auf Abnehmerseite, die initiiert ist, werden dazu in einer ersten Aktivität `InitInitiator` die zuvor ermittelten Bedarfe ausgelesen, bevor `CalculateSPLDemands` diese in Objekte überführt, die zusätzlich Informationen zum zuständigen Lieferanten enthalten. Zuletzt werden in `SendNoncommittalPartReq` diese Informationen übermittelt. Auf Teilnehmerseite erfolgt die Initialisierung in `RcvNoncommittalPartReq` sowie das Empfangen der Nachricht über den Subflow `Collect ACLMessage`, der aus einer einzelnen Aktivität besteht, die die ankommenden Vorschauinformationen entgegennimmt und im Datenmodell des Agenten hinterlegt.

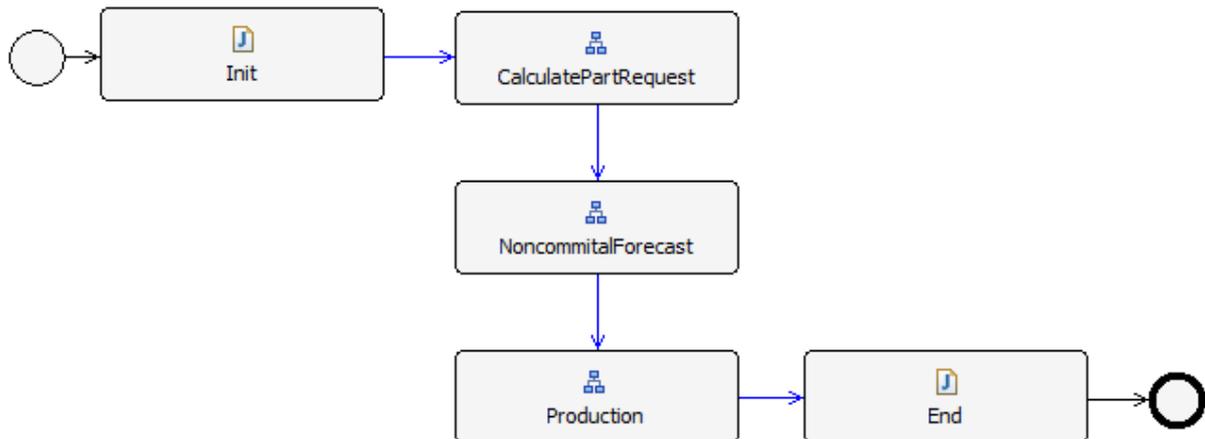


Abbildung 6.7.: Workflow OEMPlanning

6.2.3.4. Production

Der Workflow `Production` (vgl. Abbildung 6.10) stellt den dritten und abschließenden Subworkflow von `OEM Planning` dar. Er besteht selbst wiederum aus drei Subworkflows. Zunächst wird der Planungsprozess des Spediteurs angestoßen (vgl. 6.2.3.7). Anschließend werden die zur Produktion in der aktuellen Periode benötigten Teile mittels des Workflows `InventoryWithdrawal` aus dem Lager entnommen. Zuletzt wird der daraus resultierende neue Bestand über den Workflow `SubmitInventoryLevel` den zuständigen Lieferanten übermittelt.

6.2.3.5. InventoryWithdrawal

Dieser Workflow besteht aus der einzelnen Aktivität `TakePartsFromInventory`. Diese iteriert über die produzierten Produkte der Periode und greift auf das Inventarmodell des Agenten zu, um die entsprechenden Teile dafür zu entnehmen. Zur Sicherheit wird auch auf eine Verletzung des Minimalbestandes geprüft, die aber auf Grund des Planungsprozesses nicht auftritt und daher auf einen Implementierungsfehler hinweisen würde.

6.2.3.6. SubmitInventoryLevel

Dieser Workflow ist analog zu `NoncommittalForecast` (vgl. 6.2.3.3) aufgebaut. Es werden also die Bestände für die jeweiligen Lieferanten zusammengestellt und versendet. Auf

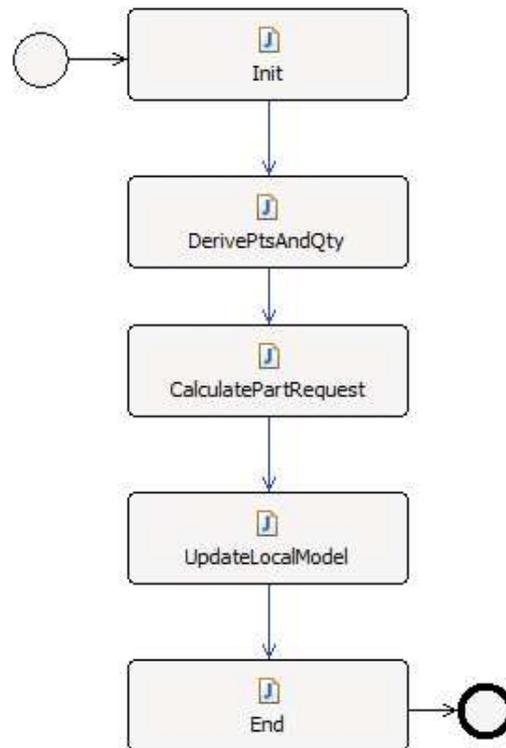


Abbildung 6.8.: Workflow CalculatePartRequest

Empfängerseite empfängt der Workflow `CollectInventoryLevel` diese Nachrichten und modifiziert das lieferanteninterne Lagerhaltungsmodell.

6.2.3.7. LSPPlanning

Zentraler Workflow des Planungsprozesses ist `LSPPlanning` (vgl. Abb. 6.11). Über diesen werden die Ergebnisse der lokalen Planungen der Lieferanten abgefragt, ausgewertet und bestätigt. Die Unterteilung in über- und innerperiodische Planung ist direkt ersichtlich. In den beiden parallel dargestellten Planungsabläufen werden zunächst die Koordinationsangebote der Lieferanten eingeholt, danach bewertet und anschließend mitgeteilt. Diese drei Schritte sind jeweils durch Subworkflows implementiert. Diese werden in den folgenden Abschnitten einzeln beschrieben. Ob der Workflow allerdings durchlaufen wird, entscheidet die Fallunterscheidung `CheckForPlanningPeriod`. Da die Planung immer für einen festen Horizont vorgenommen wird, wird auch der Planungsworkflow nur zu Beginn dieser Intervalle durchgeführt. Innerhalb dieser Zeiträume findet lediglich die Belieferung statt, die sich in den Subworkflow `Delivery` anschließt.

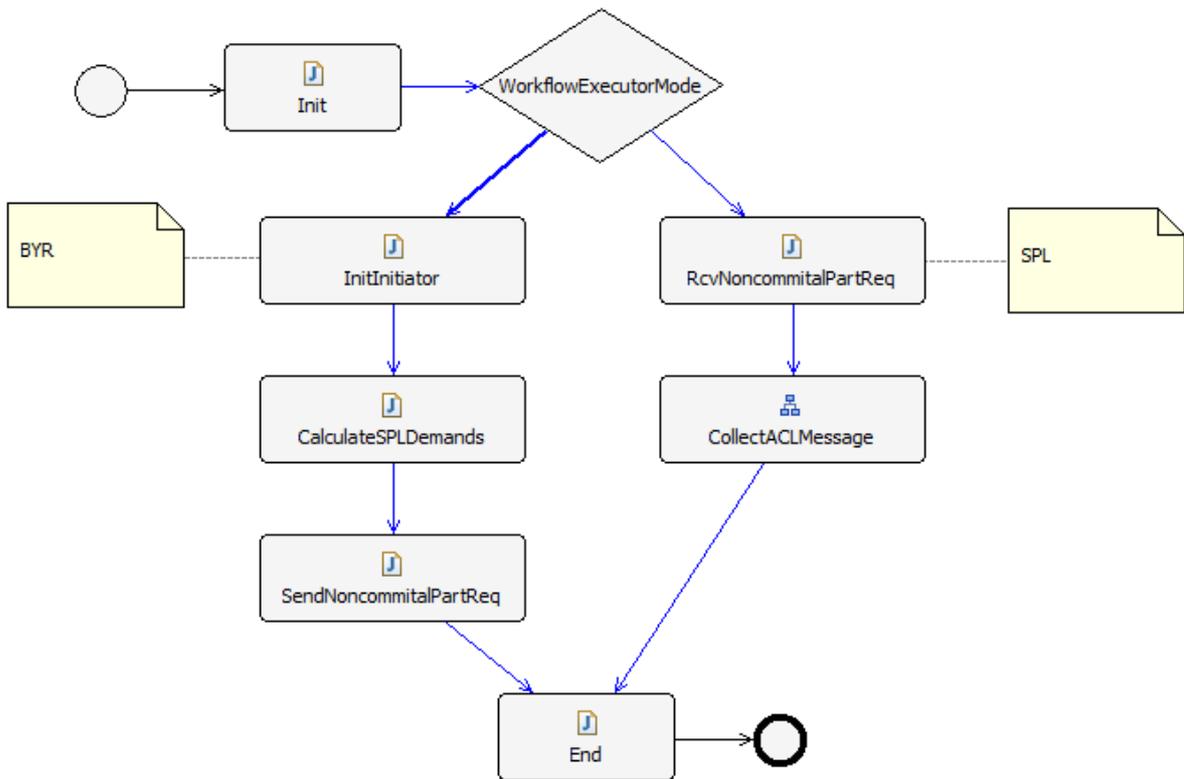


Abbildung 6.9.: Workflow NoncommittalPartRequest

6.2.3.8. CallForInterPeriodPlanningProposal

Der Subworkflow `CallForInterPeriodPlanningProposal` als externer Workflow verzweigt nach einer Fallunterscheidung, die danach unterscheidet, ob der Workflow proaktiv, d.h. vom Spediteur, oder reaktiv, d.h. vom Lieferanten, gestartet wurde. Im proaktiven Fall wird allen bekannten Lieferanten eine Nachricht gesendet, die sie zum Starten des vorliegenden Workflows auffordert. Es wird danach in der Aktivität `WaitForAnswer` auf Antworten gewartet und der Workflow erst dann fortgesetzt, wenn jeder Lieferant geantwortet hat. Die eingehenden Nachrichten werden von einem entsprechenden Behaviour entgegen genommen; selbiges verwaltet auch den Zähler zum Prüfen der Ausführungsunterbrechung sowie das interne Datenobjekt, welches die eingegangenen Koordinationsangebote enthält. Der Lieferant führt die zwei maßgeblichen Aktivitäten `GenerateShippingProposal` und `SendShippingProposal` durch. In der ersten werden die verschiedenen Optimierungsmodelle durchlaufen. Nachdem zuerst die aus Lieferantensicht optimale Lösung bestimmt wurde, werden die in 5.3.2.1.1 beschriebenen Alternativen erstellt und bewertet. Das Bündel dieser Lösungen wird im zweiten Schritt dem Spediteur zurückgemeldet.

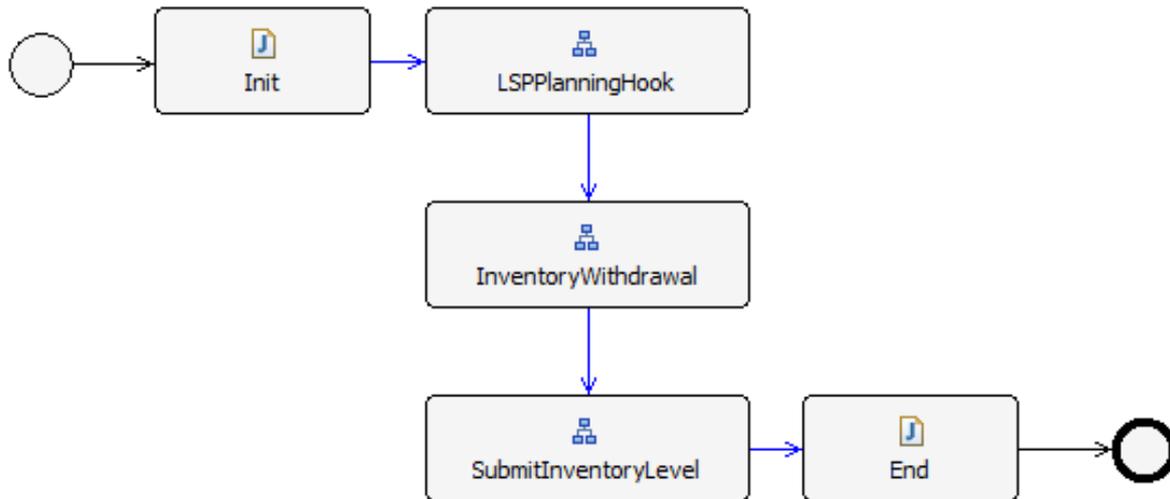


Abbildung 6.10.: Workflow Production

6.2.3.9. CalculateTour

Der Workflow `CalculateTour` (nicht abgebildet) besteht nur aus einer einzelnen Aktivität, `OptimizeTour`. An dieser Stelle nimmt der Spediteur die in 5.3.2.1.2 beschriebene Auswahl der Koordinationsalternativen vor. Dazu werden über einen Standard-Tabusearchalgorithmus (vgl. z.B. [Ree95, S. 70ff.]) verschiedene Kombinationen der Koordinationsangebote erstellt und geprüft. Die Prüfung in diesem überperiodischen Fall besteht in der Ermittlung der benötigten Fahrzeuge und der im optimalen Falle zu fahrenden Strecke ohne Berücksichtigung der noch unbestimmten Zeitfenster. Die Länge der Tabuliste beträgt die Hälfte der verfügbaren Alternativen und die Anzahl der Durchläufe, nach denen die Suche ohne eine weitere Verbesserung abgebrochen wird, beträgt das Zehnfache der verfügbaren Alternativen.

6.2.3.10. CommunicateInterPeriodAlternative

Der Workflow `CommunicateInterPeriodAlternative` (vgl. Abbildung 6.13) sorgt zum Abschluss der innerperiodischen Planung für die Übermittlung der im vorherigen Schritt ermittelten Koordinationsalternativen. Der externe Workflow enthält die Aktivität `Send Schedule` für den Lieferanten und `GetDemandSet` für den Spediteur. Nach dem Durchlaufen dieses Workflows ist der innerperiodische Planungsprozess abgeschlossen.

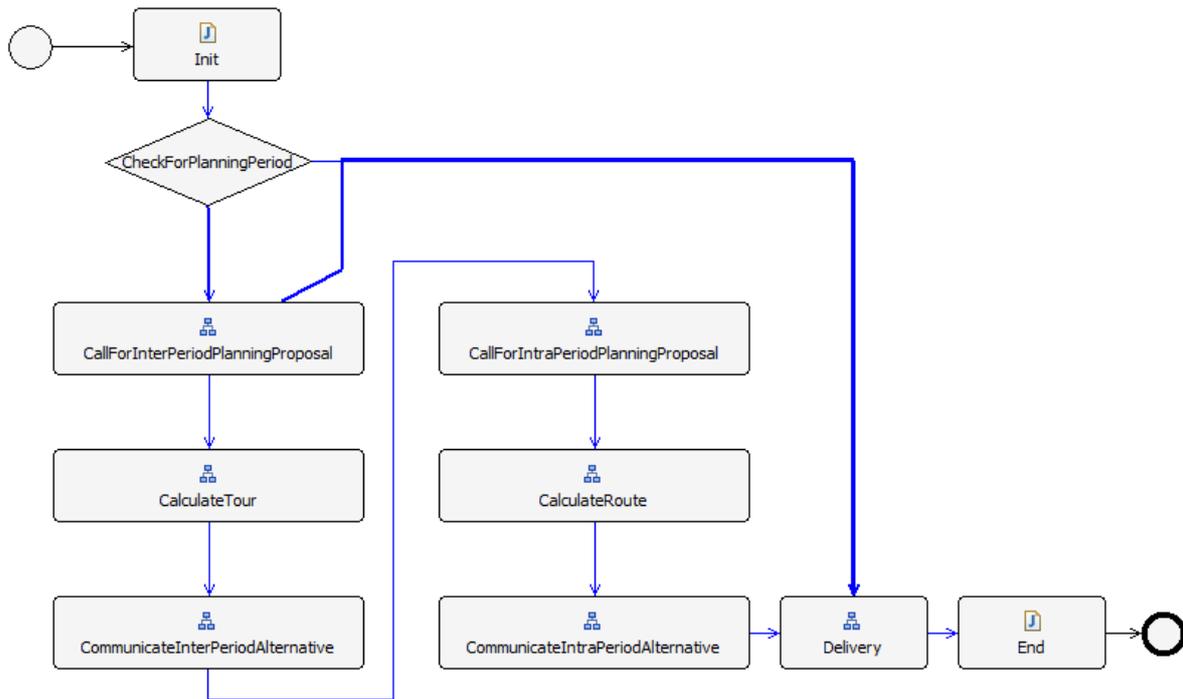


Abbildung 6.11.: Workflow LSPPlanning

6.2.3.11. Innerperiodische Workflows

An die interperiodische Planung schließt sich die innerperiodische an. Sie ist vollständig analog dazu aufgebaut und umfasst die Workflows `CallForIntraPeriodPlanningProposal`, `CalculateRoute` und `CommunicateIntraPeriodAlternative`. Auch diese weisen intern den gleichen Aufbau auf, verhandeln aber statt über Mengen über Bereitstellungszeitpunkte. Dazu werden die gleichen Nachrichten, Objekte und Algorithmen genutzt.

6.2.3.12. PartsExchange

Letztendlich führt der Workflow `PartsExchange` (vgl. Abb. 6.14) in jeder Periode die Anlieferung der Teile durch. Dazu stellt der Spediteur in der Aktivität `IdentifyProducedParts` fest, welche Liefermengen mit den Lieferanten vereinbart wurden. Diese werden dem Abnehmer über die Aktivität `TransferParts` mitgeteilt. Der Abnehmer besitzt die Aktivität `UpdateInventory`, die diese Nachricht entgegennimmt und das lokale Inventarmodell entsprechend anpasst.

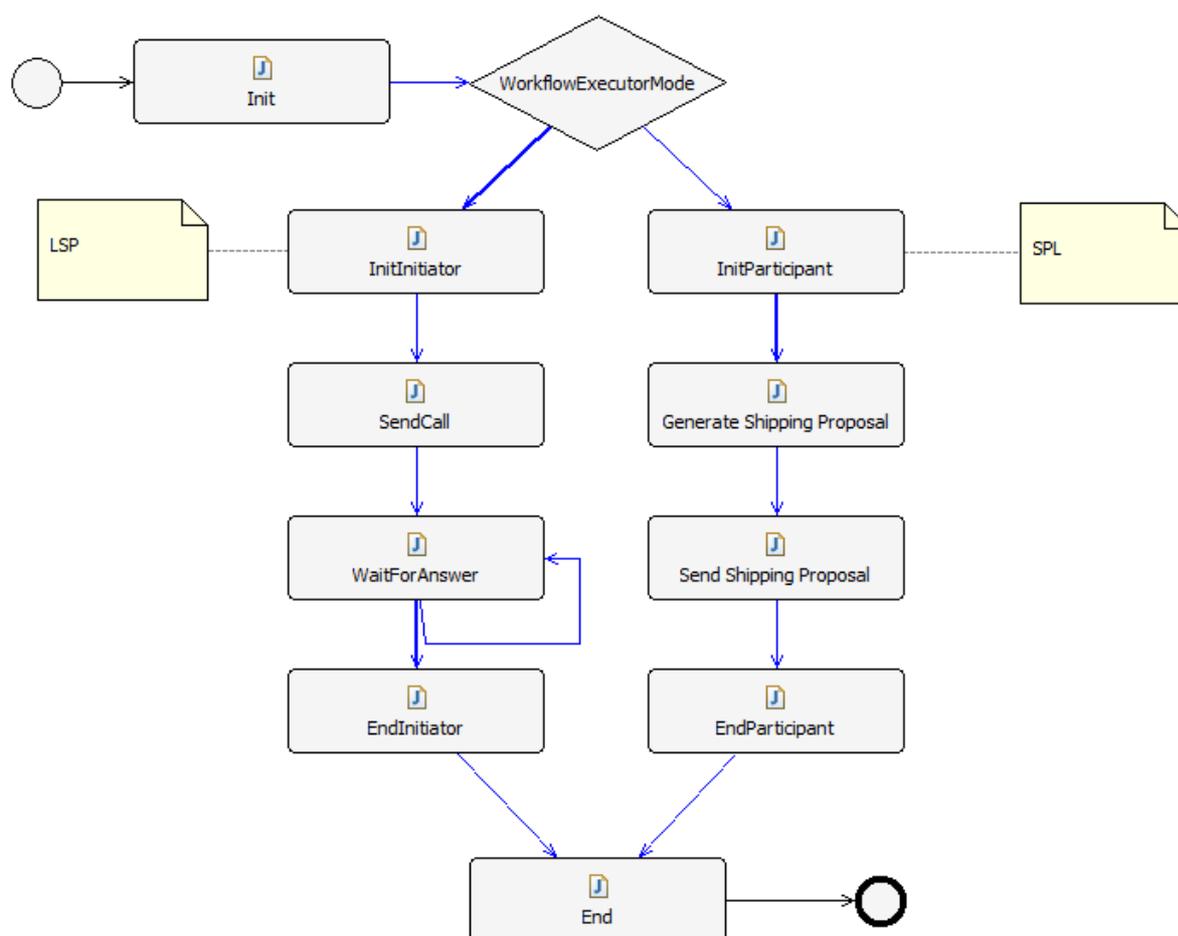


Abbildung 6.12.: Workflow CallForInterPeriodPlanningProposal

6.2.4. Ontologien

Die benötigten Ontologien wurden innerhalb des Editors „Protégé“² modelliert. Mit Hilfe des Ontology Bean Generators³, einem Plug-in für Protégé, ließen sich daraus Java-Klassen erstellen, die direkt in Java/JADE verwendet werden können und die die benötigten Datenzugriffsmethoden zum Lesen, Schreiben und Löschen von Daten vordefiniert haben. Sie sind im JADE-Projekt im Package `frisco.ontology.frisco` abgelegt. Die durch den Bean Generator erzeugten Klassen haben keinen direkten Bezug mehr zu der Ontologie, von der sie abgeleitet wurden. Vielmehr ist die Struktur implizit durch die Abbildung auf elementare Java-Datentypen und Listen für Mehrfachbeziehungen gegeben. Zusätzlich werden die von JADE vorgegebenen Vererbungsstrukturen eingehalten, sodass

²<http://protege.stanford.edu/>

³<http://protege.cim3.net/cgi-bin/wiki.pl?OntologyBeanGenerator>

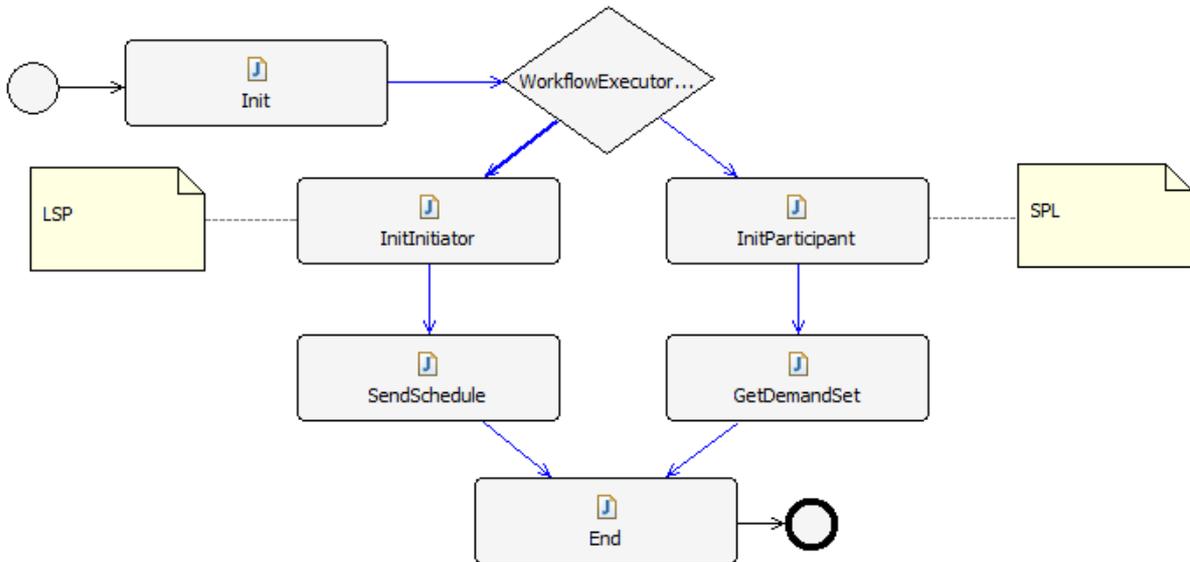


Abbildung 6.13.: Workflow CommunicateInterPeriodAlternative

jede Klasse zu „Concept“ eine is-a-Beziehung besitzt.

6.2.5. Implementierung der Simulationssteuerung

Der Simulationsagent stellt die zentrale Simulationssteuerung dar und unterscheidet sich grundlegend von den weiteren aus der Oberklasse `AgentFriscoSCPpartner` abgeleiteten Agenten, vor allem dadurch, dass er nicht planend innerhalb des Produktionsnetzwerks tätig wird und nur einmalig instanziiert werden kann. Seine Aufgabe im Multiagentensystem umfasst die im Zusammenhang mit der Ausführung von Simulationsszenarien stehende Erzeugung und Steuerung von Instanzen der planenden Agenten zur Laufzeit des Systems sowie insbesondere die Ereignissteuerung. Als Ereignisse werden hierbei die Start- und Beendigungsvorgänge des gewählten Szenarios und die für alle Beteiligten maßgebliche Verwaltung der gegenwärtig zu simulierenden Planungsperiode sowie deren Fortschreiten angesehen.

Der Simulationsagent ist für die zentrale Steuerung des Simulationssystems zuständig und startet und verwaltet die Simulationsläufe. Der Start eines Simulationsszenarios geschieht in drei Schritten:

- Starten des Simulationsagenten

Es wird beim Start des Systems eine Instanz der Klasse `frisco.simlib.starter`.

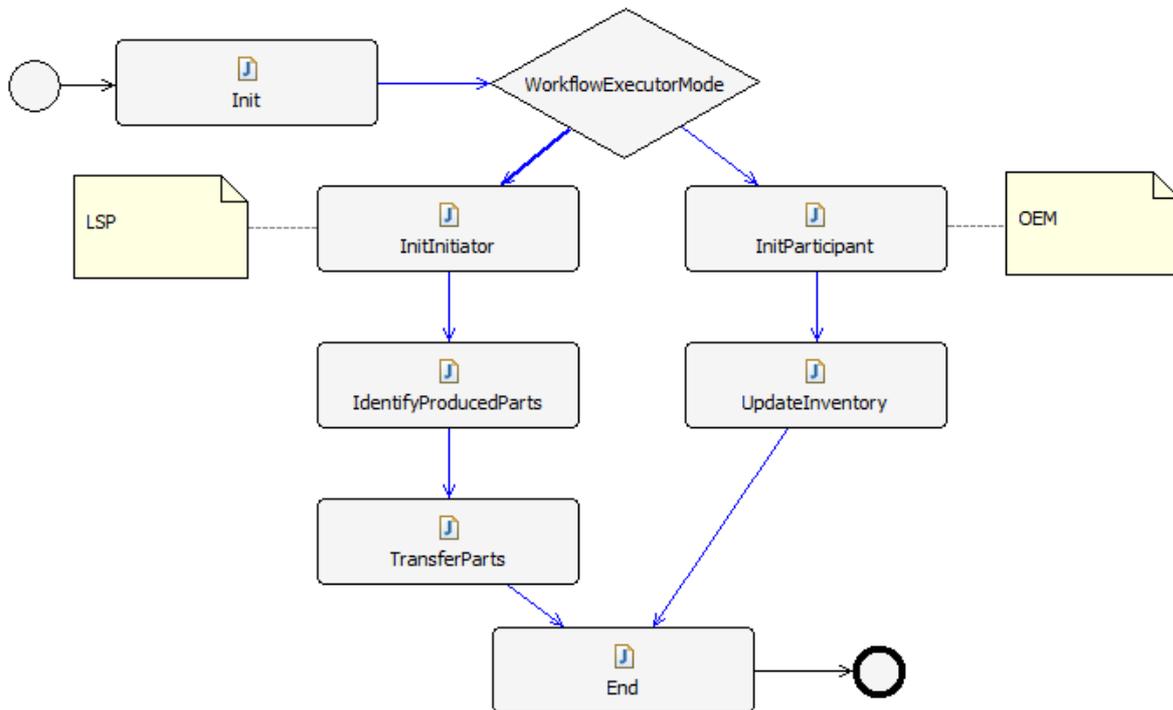


Abbildung 6.14.: Workflow PartsExchange

`StartSimulation` erzeugt und die Methode `main()` aufgerufen. Dabei wird die JADE/WADE-Agentenplattform durch Aufruf der Methode `jade.Boot.main()` initialisiert, welcher als Startargument der Dateiname der Konfigurationsdatei `main.properties` übergeben wird. Diese enthält neben der ID der Agentenplattform (FRISCO) die Anweisung zur Bereitstellung des „JADE Remote Agent Management GUI“ sowie den Agenten- und Klassennamen (`frisco.simlib.SimControlAgent`) des Simulationsagenten, um dessen Ausführung anzustoßen.

- Einbinden der Szenariendaten

Nach dem Start initialisiert der Simulationsagent das lokale Simulationsdatenmodell durch Einlesen des Szenario-Repositorys „DefaultSimScenarioRepository.xml“, welches den Ort darstellt, an dem alle Szenarien definiert werden. Zuletzt wird die Ausführung des Workflows `WkfSimStartSimulation` angestoßen.

- Starten der Simulation

Der Simulationsstartworkflow öffnet und startet das definierte Standardszenario. Er bedient sich dazu des Workflows `WkfSimStartScenario`, der zunächst die im Szenario definierten Agenten startet und danach die lokalen Initialisierungsworkflows

anstößt.

Das Graphical User Interface (GUI) (vgl. Abb. 6.15) bietet vier Ansichten, die über die Reiter „Info“, „Messages“, „Sim MAP/Ctrl“ und „Coordination Summary“ erreichbar sind. Die Ansicht „Info“ zeigt Eigenschaften des Agenten und stimmt mit der gleichnamigen Ansicht der anderen Agenten überein. „Messages“ zeigt gesendete und empfangene Nachrichten sowie Statusmeldungen. „Sim MAP/Ctrl“ bietet die Schaltflächen zur Steuerung der Simulation, die unter einer Karte angeordnet sind, die die geographischen Positionen der Supply Chain-Teilnehmer anzeigt. Eine Liste zeigt die verfügbaren Szenarien, die gestartet und angehalten werden können. Die Schaltfläche „Increment Period“ meldet den übrigen Agenten den Wechsel von einer Periode in die nächste. Die teilnehmenden Agenten werden in der Liste darunter angezeigt. Wie bei den anderen Agenten auch befindet sich rechts unten die Anzeige der aktuellen Periode. Die Ansicht „Coordination Summary“ wird bei diesem Agenten nicht genutzt.

6.2.6. Implementierung der Planungsentitäten

Die Planungsentitäten sind so implementiert, dass sie über die für ihre Planungsaufgaben nötigen Datenmodelle verfügen. Für die produzierenden Agenten, also OEM und Supplier, sind dies: Stückliste, Bedarfe, Lagerbestand, Teiledefinitionen, Ressourcen, Rüstzeiten und Koordinationsdaten. Für den Spediteur-Agenten sind es: Entfernungsgraph, Servicezeiten, Flotte, Touren und Koordinationsdaten.

Die GUI für den Abnehmer (vgl. Abb. 6.16) enthält Ansichten für Kundenaufträge (Orders), versendete Bedarfsprognosen (NoncommittalPartRequest), Lagerbestand (Inventory), Stückliste (Product Line/BOM), Teileinformationen (Parts), Karte (Local MAP-Control and Summary), sowie die agentenübergreifenden Info, Messages und Coordination Summary. Da der Abnehmer nicht am Koordinationsprozess teilnimmt, ist die letztere Sicht ungenutzt.

Die GUI für die Lieferanten (vgl. Abb. 6.17) enthält Ansichten für Lagerbestand (Inventory), Stückliste (Product Line/BOM), Teileinformationen (Parts), Karte (Local MAP-Control and Summary), sowie die agentenübergreifenden Info, Messages und Coordination Summary. In Coordination Summary wird eine Zusammenfassung der bisherigen Koordinationsvereinbarungen angezeigt. Diese besteht für einen Lieferanten aus den empfangenen Kompensationszahlungen für Inter- und Intraalternativenauswahl des Spediteurs.

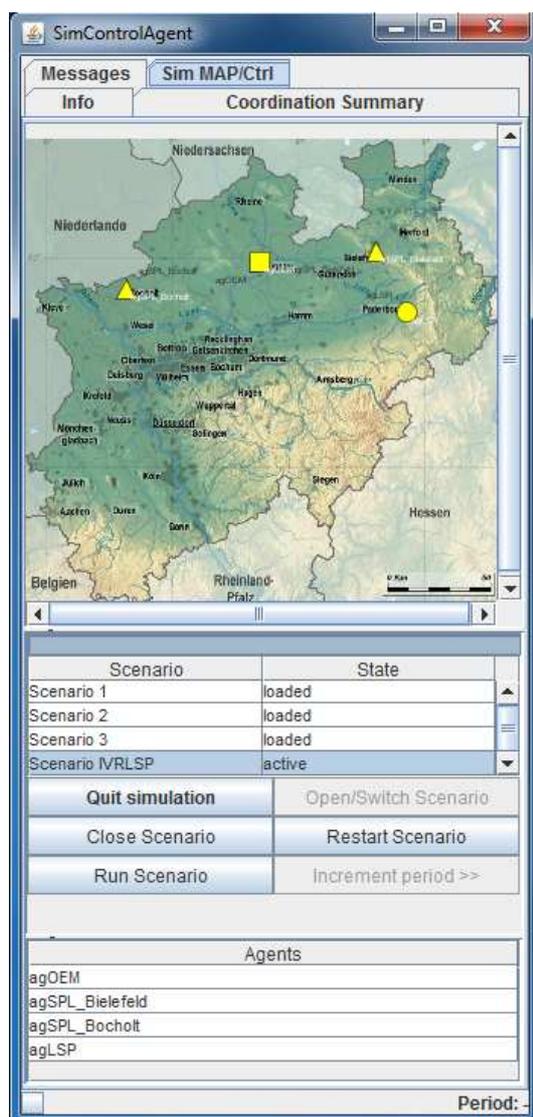


Abbildung 6.15.: GUI des SimAgent

Die GUI für den Spediteur (vgl. Abb. 6.18) enthält Ansichten für die Flottenauslastung (Periodical Fleet Utilization), die Transportaufträge (Transfer Orders), Karte (Local MAP-Control and Summary), sowie die agentenübergreifenden Info, Messages und Coordination Summary. Coordination Summary zeigt in diesem Fall die insgesamt gezahlten Kompensationszahlungen, aufgeschlüsselt nach inter- und intraperiodischer Verhandlung sowie der jeweils dadurch erzielten Einsparungen.

Order No.	Type	Part	Supplier	Quantity	EntryDate	DueDate	SPLPic...
17850162A	Reservatio	A	agSPL_Bod	12	P:0 Hr:0	P:3 Hr:2	n/a
27009115A	Reservatio	A	agSPL_Bod	20	P:0 Hr:3	P:3 Hr:7	n/a
27009115F	Reservatio	F	agSPL_Bie	10	P:0 Hr:3	P:3 Hr:7	n/a
27119465B	Reservatio	B	agSPL_Bod	60	P:0 Hr:1	P:3 Hr:9	n/a
27009115B	Reservatio	B	agSPL_Bod	50	P:0 Hr:3	P:3 Hr:7	n/a
17850162C	Reservatio	C	agSPL_Bod	6	P:0 Hr:0	P:3 Hr:2	n/a
27119465A	Reservatio	A	agSPL_Bod	40	P:0 Hr:1	P:3 Hr:9	n/a
17850162E	Reservatio	E	agSPL_Bie	18	P:0 Hr:0	P:3 Hr:2	n/a
17850162D	Reservatio	D	agSPL_Bie	24	P:0 Hr:0	P:3 Hr:2	n/a

Status: Finished..WkfvRLSPfriscoOEMPlanning Period: 1

Abbildung 6.16.: GUI des Abnehmer-Agenten

Type	Factor	ItemNum...	ItemName	BuildTime	Consists ...	Supplied ...
Part	1	68D		1.5		
Part	1	69E		2.5		
Part	1	70F		2.5		

Status: CallForIntraPeriodProposal: Erzeuge Alternativen Period: 1

Abbildung 6.17.: GUI eines Lieferanten-Agenten

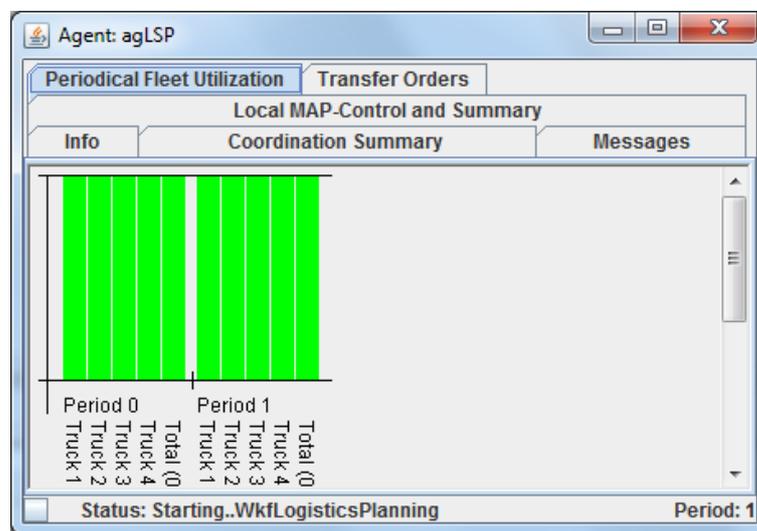


Abbildung 6.18.: GUI des Spediteur-Agenten

6.3. Ergebnisse

In diesem Abschnitt wird zunächst der Aufbau des Testszenarios erläutert. Im Anschluss werden die Ergebnisse erläutert, die mittels sukzessiver, zentraler und dezentraler Planung ermittelt wurden.

6.3.1. Aufbau des Szenarios

An dieser Stelle wird beschrieben, welche Daten gewählt wurden, um die Verfahren zu testen. Da keine Praxisdaten zur Verfügung standen, wurden die Szenarien möglichst realitätsnah gestaltet. Als Planungshorizont wurde jeweils eine Länge von fünf Tagen gewählt. Dies ist ein Kompromiss zwischen den 1-15 Tagen, die für einen Lieferfeinabruf angenommen werden (vgl. [Ver03b, S. 6]) und den 1-2 Tagen, die ein Spediteur vor der Lieferung informiert wird.

6.3.1.1. Bedarfe

Bei der Wahl des Parameters zur Bestimmung der Kapazitätsauslastung werden Rüstkosten bei der Generierung der Bedarfe nicht beachtet. Daher ist es empfehlenswert, einen Wert zu wählen, der dafür ausreichend Spielraum lässt. In der Praxis wird oft ein Wert von etwa 60% für die tatsächliche Produktionszeit der Ressourcen angegeben⁴. Für die vorliegende Untersuchung wurde der Wert auf 80% festgelegt, da es nicht zu Maschinenausfällen o.ä. kommt.

Grundlegend wurden fünf Produkte PA bis PE definiert. Diese weisen die in Tabelle 6.2 angegebenen Stücklisten und Bedarfe auf. Wie in 5.4.1 beschrieben weisen die Bedarfe eine Varianz auf, die zu den bekannten Abrufschwankungen führt. Die Tagesproduktionsmenge an Endprodukten wird dennoch immer auf 100 Stück angeglichen. Dies entspricht dem Verhalten in der Praxis, bei dem ein Automobilwerk zwar eine konstante Tagesproduktionsmenge besitzt, diese aber auf sehr viele Varianten verteilt ist.

Die verbauten Teile weisen die in Tabelle 6.3 ausgewiesenen Eigenschaften auf. Zusätzlich existieren für jeden Lieferanten vier externe Teile. Davon hat eines jeweils eine Produkti-

⁴nach Angaben eines Automobilzulieferers

Produkt	Stückliste	Bedarfsmittelwert	Bedarfsvarianz
PA	10 A 10 B 10 C 10 E 10 H	50	25
PB	10 D 20 E 10 I	25	32
PC	20 A 10 F	10	8
PD	20 B 50 C 10 G 10 H	10	20
PE	10 D 20 F 30 I 10 H	5	16

Tabelle 6.2.: Stücklisten der Szenarien-Produkte

onszeit von 0,1; für die übrigen beträgt sie 0,5. Die Mindest- und Maximalbestände sind jeweils 0 und 5000, Lagerkosten treten für sie nicht auf.

6.3.1.2. Standorte

Damit eine Sammeltour unter wirtschaftlichen Aspekten sinnvoll ist, müssen sich die bedienten Lieferanten innerhalb einer Region befinden. In Deutschland sind Radien von etwa 100 km für eine Sammeltour üblich (vgl. [Fle08, S. 14]). Wird Paderborn als Zentrum gewählt, so entspricht dies grob dem Bereich zwischen Dortmund, Minden, Göttingen und Marburg.

Die Standorte sind auf Abbildung 6.19 eingezeichnet, in Tabelle 6.4 findet sich die Übersicht ihrer Eigenschaften. Die Opportunitätskosten betragen für alle Lieferanten 50 GE, die Servicezeit ist jeweils 30 Minuten lang.

Teil	Prod.zeit	Volumen	Gewicht	Lagerkosten	Min/Max-Bestand
A	1	0,01	0,015	0,006	1000/2000
B	0,5	0,007	0,0055	0,01	700/2500
C	0,75	0,025	0,006	0,002	2000/8000
D	0,1	0,03	0,06	0,01	500/1500
E	0,8	0,04	0,0015	0,005	1250/3000
F	0,25	0,06	0,008	0,017	300/1000
G	3	0,4	0,019	0,04	300/600
H	0,75	0,04	0,007	0,012	850/1000
I	1,5	0,007	0,023	0,03	550/700

Tabelle 6.3.: Eigenschaften der internen Teile

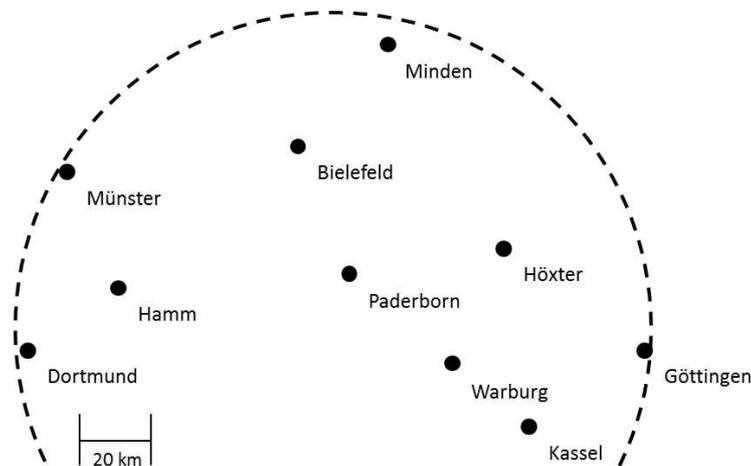


Abbildung 6.19.: Geographische Standorte der Akteure

6.3.2. Ergebnisse der sukzessiven Planung

Die Ergebnisse der sukzessiven Planung bilden die Referenz für die neuen Planungsverfahren. Sie bilden den Ist-Zustand ab, der sowohl durch getrennte Planung der Lieferanten untereinander als auch durch die Abkopplung von der Transportplanung geprägt ist. Die Ergebnisse finden sich in Tabelle 6.5. Die Vermutung, dass die Entkopplung der Zeithorizonte dazu führen wird, dass das gesamtoptimale Ergebnis nicht zwangsläufig mit dem optimalen Ergebnis der überperiodischen Planung als Grundlage für die innerperiodische Planung erzielt werden wird, konnte bestätigt werden. Bei der Iteration durch den Ergebnispool wurden eine suboptimale Lösungen gefunden, die die Grundlage für die gesamtoptimale Lösung bildete.

Lieferant	Position x	Position y	Teil
Dortmund	-92	23	A
Hamm	-65	4	B
Münster	-81	31	C
Bielefeld	-12	39	D
Minden	15	-69	E
Warburg	35	27	F
Höxter	50	-8	G
Göttingen	92	23	H
Kassel	58	46	I

Tabelle 6.4.: Eigenschaften der Lieferanten

Indikator	Wert
Gesamtkosten	127764
Produktionskosten	117478
Lagerhaltungskosten	408
Transportkosten	9876
Gesamtrüstzeit	2350
Gefahrene km	3708
Eingesetzte LKW	18

Tabelle 6.5.: Ergebnisse der sukzessiven Planung

6.3.3. Ergebnisse der integrierten Planung

Durch das integrierte Verfahren wurde die in Tabelle 6.6 zusammengefasste Lösung ermittelt. Es ist ersichtlich, dass sie in allen Punkten schlechter ist als die sukzessive. Dies liegt an der Minimierung der eingesetzten LKW. Demnach ist es möglich, eine Lösung zu finden, die nur drei LKW nutzt, dafür sind aber sehr viel mehr Rüstvorgängen in Kauf zu nehmen. Nahezu jedes interne Teil wird in jeder Periode gefertigt. Auch werden, bedingt durch die Losgewichte und -volumen, Routen notwendig, die nur auf die Kapazitätsszusammenstellung optimiert werden konnten, nicht jedoch auf die Länge der Strecke. Daher werden auch insgesamt mehr Kilometer gefahren. Es steht demnach fest, dass die Minimierung der Zahl der LKW nicht das alleinige Ziel der Planung sein kann. Demzufolge wurde die Zahl der verfügbaren LKW auf vier erhöht. Das Planungsergebnis wird in Tabelle 6.7 dargestellt.

Im Vergleich fällt auf, dass nun die Produktionskosten zu Lasten der Transportkosten gesenkt wurden, d.h. die Einsparungen, die durch die Optimierung der Produktion erzielt

Indikator	Wert
Gesamtkosten	139560
Produktionskosten	130712
Lagerhaltungskosten	387
Transportkosten	8459
Gesamtrüstzeit	2614
Gefahrene km	4055
Eingesetzte LKW	15

Tabelle 6.6.: Ergebnisse der integrierten Planung, 3 LKW

Indikator	Wert
Gesamtkosten	134015
Produktionskosten	123606
Lagerhaltungskosten	416
Transportkosten	9994
Gesamtrüstzeit	2472
Gefahrene km	4204
Eingesetzte LKW	18

Tabelle 6.7.: Ergebnisse der integrierten Planung, 4 LKW

werden können übertreffen die möglichen Einsparungen beim Transport. Auch die Lagerbestände erhöhen sich, da die Lieferanten nicht in jeder Periode produzieren müssen. Die Lösung ist insgesamt besser. Dennoch ist sie weiterhin schlechter als die sukzessiv gefundene Lösung. Auffällig ist, dass beide Lösungen 18 LKW einsetzen, die Sukzessivlösung allerdings in einer Periode fünf LKW gleichzeitig einsetzt, was bei der integrierten Lösung nicht möglich ist. Daher wurde auch das Ergebnis der integrierten Planung für fünf verfügbare LKW evaluiert. Diese nutzt allerdings auf Grund der Entfernungsabschätzung der Zielfunktion in jeder Periode nicht mehr als vier Fahrzeuge, die Qualität der sukzessiven Lösung wird also wiederum nicht erreicht.

6.3.4. Ergebnisse der dezentralen Planung

Die erstellten Koordinationsangebote der Lieferanten stellen, bis auf das Ergebnis der reinen CLSP-T-Planung, eine nicht optimale Untermenge der möglichen Lösungen der Losgrößenoptimierung dar. Dies ist analog zum Lösungspool, der beim zentralen heuristischen Verfahren genutzt wird. Die dort befindlichen Lösungen sind jedoch alle bereits auf den gemeinsamen Transport ausgelegt, während dies bei den Koordinationsangeboten

nicht der Fall ist. Für das gewählte Szenario konnte die heuristische Suche des Spedituragenten unter Beachtung der zu zahlenden Kompensationskosten keine bessere als die Ausgangslösung identifizieren. Es ist anzumerken, dass das Testen des dezentralen Verfahrens insbesondere durch die regelmäßigen Abstürze der JADE-Plattform erschwert wurde.

6.3.5. Variation des Szenarios

Für diesen Test wurden einige Änderungen am zuvor beschriebenen Szenario vorgenommen. Zunächst wurde die Varianz aller Produkte vervierfacht sowie das Anheben der Tagesproduktionsmenge deaktiviert. Außerdem wurde der Bedarf in der ersten Periode um 25% verringert und in der letzten Periode um 10% erhöht. Dies soll widerspiegeln, dass der Planungshorizont nur einen Ausschnitt darstellt und Lastspitzen zu Beginn des Horizonts nicht ausgeglichen werden können während gegen Ende oft eine Unterauslastung festzustellen ist. Zudem wurde die Kapazitätsauslastung der Lieferanten auf 60% gesenkt.

In diesem Fall konnte die integrierte Planung eine Verbesserung erzielen. Es zeigte sich, dass die Berücksichtigung der Transporte zu einer Verbesserung der Gesamtplanung beitragen kann, auch wenn die Produktionskosten leicht steigen. In Tabelle 6.8 sind die Werte der sukzessiven und der integrierten Planung gegenübergestellt. Die integrierte Planung hatte drei LKW zur Verfügung. Dass die Gesamtstreckenlänge gegenüber der integrierten Planung ansteigt, ist wiederum darauf zurückzuführen, dass zu Gunsten weniger LKW die Zusammenstellung der Touren u.U. zu Umwegen führt, die nicht durch eine innerperiodische Resequenzierung ausgeglichen werden können.

Indikator	Wert sukzessiv	Wert integriert	Diff.
Gesamtkosten	93319	92500	-0,9%
Produktionskosten	83066	84200	+1,4%
Lagerhaltungskosten	431	416	-3,5%
Transportkosten	9823	7884	-19,7%
Gesamtrüstzeit	1661	1684	+1,4%
Gefahrene km	3474	3735	+7,5%
Eingesetzte LKW	18	14	-22%

Tabelle 6.8.: Gegenüberstellung der Ergebnisse

6.3.6. Fazit

Die Testläufe zeigen, dass die Berücksichtigung des Transports die Produktionsplanung beeinflusst. Es wurde deutlich, dass dies vor allem auf der überperiodischen Ebene von Relevanz ist, beim Scheduling konnten keine Verbesserungen erzielt werden. Dies kann jedoch, trotz der iterativen Suche im Lösungspool, auf die fehlende Rückkopplung zwischen den Planungsebenen zurückgeführt werden. Es ist zu erwarten, dass durch eine bessere Abstimmung die Ergebnisse noch weiter verbessert werden können.

6.4. Gedanken zur praktischen Umsetzung

In dieser Arbeit wurde insbesondere der planerische Lösungsansatz verfolgt. Daneben ist jedoch auch der organisatorische Aspekt von großer Bedeutung, denn die beschriebene Kooperation kann nicht ad hoc, sondern nur gezielt verwirklicht werden. Dazu sind wie in jeder Supply Chain-Kooperation mehrere Phasen zu durchlaufen, die von der Initiierung des Vorhabens bis zum geregelten Ausstieg reichen (vgl. [KH02]).

Neben der beschriebenen Konstellation ist auch die Einbidung eines so genannten „Supply Chain Orchestrators“ oder eines „4PL“ möglich (vgl. Abbildung 6.20). Beide Konzepte beschreiben eine Koordinierungsinstanz der Supply Chain, die nur über administrative Ressourcen verfügt (vgl. [SRTW08], [Ora08]). Eisenkopf [Eis02] beschreibt als Aufgaben des 4PL die Koordination der Güter- und Informationsflüsse, die Integration von Schnittstellen und die Planung der Logistikressourcen einschließlich der Synchronisation von Kapazitäten. Ein solcher neutraler Partner ist eventuell in der Lage, die Hemnisse der zentralen Planung zu überwinden und ein für alle Beteiligten günstiges Ergebnis zu erzielen.

In dieser Hinsicht sind noch viele Fragen offen, insbesondere was die Akzeptanz angeht. Durch den steigenden Wettbewerbsdruck werden sich langfristig jedoch koordinierte Lösungen durchsetzen, die, wie immer sie auch organisatorisch ausgestaltet werden, auf die in dieser Arbeit entwickelten Verfahren zurückgreifen können.

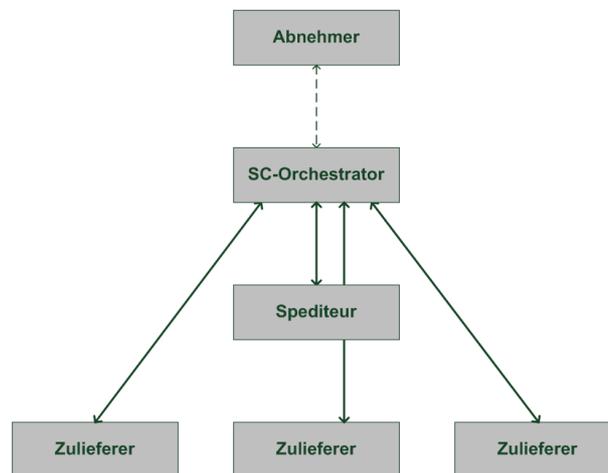


Abbildung 6.20.: Einbindung des Supply Chain-Orchestrators

7. Zusammenfassung und Ausblick

Diese Arbeit hat einen Beitrag zu der integrierten Planung von Produktion und Transport geleistet. Das Szenario aus mehreren produzierenden Einheiten und einer empfangenden Einheit in Kombination mit Routenplanung wurde zuvor nicht untersucht, obwohl sich diese Konstellation in Lieferketten häufig findet. Dabei wurden zwei Sichtweisen eingenommen. Zunächst wurde das Problem theoretisch untersucht. In diesem Schritt wurde ein integriertes mathematisches Optimierungsmodell aufgestellt. Da dieses eine zu hohe Komplexität aufweist, um Instanzen relevanter Größenordnungen lösen zu können, wurde basierend auf den zuvor identifizierten Abhängigkeiten zwischen Produktion und Transport eine Heuristik entwickelt. Es konnte gezeigt werden, dass die Einbeziehung des Transports die Losgrößenplanung beeinflusst. Zusätzlich erfolgte die praktische Betrachtung, die berücksichtigt, dass sich das vorgestellte Planungsproblem nicht von einem Unternehmen alleine, sondern nur durch Kooperation mit anderen Beteiligten lösen lässt. Es wurde daher ein dezentrales agentenbasiertes Verfahren entwickelt, das diese Einschränkungen umgeht, indem es eine verhandlungsbasierte Abstimmung definiert. Auf diese Weise müssen die Beteiligten ihre internen Daten nicht offenlegen. In dem Zusammenhang wurde gleichzeitig demonstriert, wie sich agentenbasierte Systeme für den Einsatz in Supply Chains entwickeln und über Workflows steuern lassen. Letztendlich wurde die klassische Frage „How many parts to make at once?“ um den Transportaspekt ergänzt und eine Antwort auf „How many parts to make and transport at once in a network?“ konnte im Hinblick auf Planung, Organisation und Technologie gefunden werden.

Es gibt mehrere Aufgaben, die sich anschließen. Zunächst sollte die Integration der Planungsebenen in der Heuristik weiter verbessert werden, um die Potenziale des integrierten Los- und Tourenscheduling genauer untersuchen zu können. Zudem kann für eine umfassende Betrachtung in Sinne des Supply Chain Managements auch eine Kopplung mit der strategische Ebene ergänzt werden, um umfassende Analysen schon ausgehend von der Standortplanung durchführen zu können. Zuletzt müssen die dezentralen Verfahren in

der Praxis erprobt werden. Neben weiteren Verhandlungsmechanismen ist auch die Frage nach Akzeptanz und die Balance zwischen Automation und Entscheidungsunterstützung mit Einbindung eines Disponenten zu beantworten.

Da der effiziente Transport in Produktionsnetzwerken in Zukunft weiter an Bedeutung gewinnen wird, wird es sich lohnen basierend auf den Ergebnissen dieser Arbeit, die das Planungsproblem aufgezeigt und Lösungsverfahren entworfen hat, die Thematik weiter zu vertiefen. Beispiele dafür sind die Berücksichtigung von gebrochenem Verkehr, etwa um die konsolidierte Anlieferung per Bahn abzubilden, die Berücksichtigung opportunistischen Verhaltens bei Verhandlungen oder die Vernetzung von Spediteuren untereinander. Nicht zuletzt steht mit dem geschaffenen Agentenframework eine Umgebung zur Verfügung, die speziell auch ein geeignetes Testumfeld für eine online Betrachtung bietet, d.h. dass Bedarfsschwankungen auftreten und sich die Produktions- und Transportplanung dazu in Echtzeit anpasst.

Das dynamische Umfeld von Produktionsbetrieben, das geprägt ist von steigender Produktivität und Qualität bei weiterhin geringen Lohnkosten in früheren Entwicklungsländern, steigenden Energiepreisen und einem zunehmenden Zwang zur Emissionsvermeidung, wird in Zukunft dafür sorgen, dass die Vernetzung und Abstimmung von Unternehmen weiter zunehmen wird. So wie es bei Ford in den vierziger Jahren des 20. Jahrhunderts undenkbar war, die Wertschöpfung auf mehrere Standorte bzw. Lieferanten zu verteilen, so ist es heute noch undenkbar, dass die Planung mit Lieferanten, Spediteuren und Abnehmern gemeinsam durchgeführt wird. Die wirtschaftliche Notwendigkeit und die technische Umsetzbarkeit werden dies jedoch bewirken. Diese Arbeit soll dafür einen der vielen nötigen Impulse liefern.

A. OPL-Modelle

A.1. Integriertes Losscheduling- und Tourenplanungsproblem (IVRLSP)

Listing A.1: OPL-Modell IVRLSP

```

// *** Parameter ***//

int      T = ...;           // Mikroperioden
int      PL = ...;         // Mikroperioden pro Makroperiode
int      MT = T div PL;    // Makroperioden
int      TL = ...;         // Mikroperiodenlänge
int      P = ...;          // Produkte
int      Z = ...;          // Lieferanten
int      N = ...;          // Knoten
int      L = ...;          // LKW
int      RZ[1..P, 1..P] = ...; // Rüstzeiten
int      D_i[1..P, 1..T] = ...; // interne Bedarfe
int      D_e[1..P, 1..T] = ...; // externe Bedarfe
int      M = ...;          // Big M
int      MR = ...;         // Big M für Rüstzeitzuweisung
int      K = ...;          // Kapazität der Lieferanten
int      KapKG = ...;      // Kapazität der LKW in KG
int      KapM3 = ...;      // Kapazität der LKW in M3
float    PZ[1..P] = ...;   // Produktionszeit
float    G[1..P] = ...;    // Produktgewicht
float    V[1..P] = ...;    // Produktvolumen
int      LP[1..Z, 1..P] = ...; // Zuordnung Lieferant - Produkt
int      OK[1..Z] = ...;   // Opportunitätskosten

```

```

int      LK[1..P] = ...;           // Lagerhaltungskosten
int      MinB[1..P] = ...;        // Maximalbestand Abnehmer
int      MaxB[1..P] = ...;        // Maximalbestand Abnehmer
int      C[0..N, 0..N] = ...;     // Entfernungsmatrix
int      E = ...;                 // Depotöffnung
int      S = ...;                 // Depotschließung
int      st[0..N] = ...;          // Servicezeit
int      AZ = ...;                // Zeitgrenze Anschlussaufträge
int      AW = ...;                // Wert Anschlussaufträge
float    KK = ...;                // Kraftstoffkosten
float    EK = ...;                // Emissionskosten
int      FZ = ...;                // Fahrzeugeinsatzkosten
float    F[0..N, 0..N] = ...;     // Fahrzeit
float    FR = ...;                // Fahrerkosten
int      LS = ...;                // Standgeld

// *** Entscheidungsvariablen ***//

// Losgröße:
dvar int+      q[1..Z, 1..P, 1..T];
// Rüstwechsel:
dvar boolean   ri[1..Z, 1..P, 1..P, 1..T];
// Rüstzähler:
dvar int       rz[1..Z, 0..T];
// laufender Rüstvorgang:
dvar boolean   rl[1..Z, 1..T];
// aufzuaddierende Rüstzeit:
dvar int+      ra[1..Z, 1..T];
// Rüstzustand:
dvar boolean   r[1..Z, 1..P, 0..T];
// Lager Lieferant:
dvar int+      i_l[1..Z, 1..P, 0..T];
// Lager Abnehmer:
dvar int+      i_a[1..P, 0..T];
// Materialfluss:
dvar int+      tp[0..N, 0..N, 1..P, 1..L, 1..T, 1..T];

```

```

// Fahrzeugbewegung :
dvar boolean    x[0..N, 0..N, 1..L, 1..MT];
// Anfahrzeitpunkt :
dvar int+      w[0..N, 1..L, 1..MT];
// Zeitfensterindikator Lieferanten :
dvar int+      wil[1..Z, 1..L, 1..MT, 1..T];
// Zeitfensterindikator Abnehmer :
dvar int+      wia[1..L, 1..MT, 1..T];
// Indikator für Anschlussaufträge :
dvar boolean   aaz[1..L, 1..MT];
// Indikator für Anschlussaufträge :
dvar boolean   aae[1..L, 1..MT];
// Indikator für Anschlussaufträge
dvar boolean   aa[1..L, 1..MT];
// Abstand der Eintreffzeitpunkte
dvar int+     a[1..L, 1..L, 1..MT];
// Strafminuten
dvar int+     ls[1..L, 1..L, 1..MT];

minimize      sum (z in 1..Z, p in 1..P, t in 1..T)
              i_l[z, p, t] * LK[p]
              + sum (p in 1..P, t in 1..T)
              i_a[p, t] * LK[p]
              + sum (z in 1..Z, p1 in 1..P, p2 in 1..P, t in \
                  1..T)
              ri[z, p1, p2, t] * RZ[p1, p2] * OK[z]
              + sum (i in 0..N, j in 0..N, l in 1..L, mt in 1..\
                  MT)
              C[i, j] * (KK + EK) * x[i, j, l, mt]
              + sum (l in 1..L, mt in 1..MT)
              (w[N, l, mt] - w[0, l, mt]) * FR
              + sum (l in 1..L, mt in 1..MT)
              FZ * sum (j in 1..Z) x[0, j, l, mt]
              + sum (l1 in 1..L, l2 in 1..L, mt in 1..MT)
              ls[l1, l2, mt] * LS
              - sum (l in 1..L, mt in 1..MT)
              aa[l, mt] * AW;

```

```
subject to
{
//*** Produktion ***//

forall (z in 1..Z, t in 1..T)
Kapazitaetsbeschraenkung:
sum (p in 1..P) (q[z, p, t] * PZ[p]) <= K;

forall (z in 1..Z, p in 1..P, t in 1..T)
ProduktionNurFuerAktuellenRuestzustand:
q[z, p, t] <= r[z, p, t] * M;

forall (z in 1..Z)
InitialerRuestzustand:
r[z, 1, 0] == 1;

forall (z in 1..Z)
InitialerRuestzaehler:
rz[z, 0] == 0;

forall (z in 1..Z, t in 0..T)
EindeutigerRuestzustand:
sum (p in 1..P) r[z, p, t] == 1;

forall (z in 1..Z, t in 1..T)
SetzeRuestindikator:
rl[z, t] * M >= rz[z, t];

forall (z in 1..Z, p in 1..P, t in 1..T)
KeineProduktionBeiLaufendemRuestvorgang:
q[z, p, t] <= (1-rl[z, t]) * M;

forall (z in 1..Z, t in 1..T)
RuestzaehlerFortschreiben:
rz[z, t] == rz[z, t-1] - 1 + ra[z, t];
```

```

forall (z in 1..Z, t in 1..T)
KeineZusetzlicheRuestzeitOhneRuestwechsel:
ra[z, t] <= MR * sum(p1 in 1..P, p2 in 1..P) ri[z, p1, p2, t];

forall (z in 1..Z, p1 in 1..P, p2 in 1..P, t in 1..T)
ZuAddierendeRuestzeit:
ra[z, t] - (RZ[p1, p2] + rz[z, t-1] * (-1))
<= MR * (1 - ri[z, p1, p2, t]);

forall (z in 1..Z, p1 in 1..P, p2 in 1..P, t in 1..T)
ZuAddierendeRuestzeit2:
(RZ[p1, p2] + rz[z, t-1] * (-1)) - ra[z, t]
<= MR * (1 - ri[z, p1, p2, t]);

forall (z in 1..Z, p1 in 1..P, p2 in 1..P, t in 1..T)
KeineUeberlappendenRuestvorgaenge:
rz[z, t-1] - ((1-ri[z, p1, p2, t])*M) <= ri[z, p1, p2, t];

forall (z in 1..Z, p1 in 1..P, p2 in 1..P, t in 1..T:p1!=p2)
RuestindikatorSetzen:
ri[z, p1, p2, t] >= r[z, p2,t] + r[z, p1,t-1] - 1;

forall (z in 1..Z, p in 1..P, t in 1..T)
ZuordnungLieferantProdukt:
q[z, p, t] <= M * LP[z, p];

// *** Lagerhaltung ***//

forall (z in 1..Z, p in 1..P)
InitialbestandLieferanten:
i_l[z, p, 0] == 0;

forall (z in 1..Z, p in 1..P)
InitialbestandAbnehmer:
i_a[p, 0] == MinB[p];

```

```

forall (z in 1..Z, p in 1..P, t in 1..T)
LagerbestandsgleichungLieferanten:
i_l[z, p, t] ==          i_l[z, p, t-1] + q[z, p, t] - D_e[p, t]
                        - sum (j in 0..N, l in 1..L, t_e in 1..T)
                          tp[z, j, p, l, t, t_e];

forall (p in 1..P, t in 1..T)
LagerbestandsgleichungAbnehmer:
i_a[p, t] ==          i_a[p, t-1] - D_i[p, t]
                    + sum (z in 1..Z, l in 1..L, t_s in 1..T)
                      tp[z, N, p, l, t_s, t];

forall (i in 0..N, j in 0..N, p in 1..P, l in 1..L, t_s in 1..T, \
        t_e in 1..T:t_e<t_s)
ZeitlichFortschreitenderMaterialfluss:
tp[i, j, p, l, t_s, t_e] == 0;

forall (i in 0..N, j in 0..N, p in 1..P, l in 1..L, t_s in 1..T, \
        t_e in 1..T:(t_s-1) div PL!=(t_e-1) div PL)
MaterialflussInnerhalbMakroperioden:
tp[i, j, p, l, t_s, t_e] == 0;

forall (p in 1..P, t in 1..T)
MaximalbestandAbnehmer:
i_a[p, t] <= MaxB[p];

forall (p in 1..P, t in 1..T)
MindestbestandAbnehmer:
i_a[p, t] >= MinB[p];

forall (z in 1..Z, p in 1..P, t in 1..T)
MaximalbestandLieferanten:
i_l[z, p, t] <= MaxB[p]/2;

```

```

//*** Transport ***//

forall (i in 0..N, j in 0..N, l in 1..L)
FahrzeugkapazitaetGewicht:
sum (p in 1..P, t_s in 1..T, t_e in 1..T:(t_s-1) div PL==(t_e-1) \
    div PL)
tp[i, j, p, l, t_s, t_e] * G[p] <= KapKG;

forall (i in 0..N, j in 0..N, l in 1..L)
FahrzeugkapazitaetVolumen:
sum (p in 1..P, t_s in 1..T, t_e in 1..T:(t_s-1) div PL==(t_e-1) \
    div PL)
tp[i, j, p, l, t_s, t_e] * V[p] <= KapM3;

forall (l in 1..L, mt in 1..MT)
Losfahren:
sum (j in 1..N) x[0, j, l, mt] == 1;

forall (z in 1..Z, l in 1..L, mt in 1..MT)
EinUndAusgehend:
sum (i in 0..N) x[i, z, l, mt]
- sum (i in 0..N) x[z, i, l, mt] == 0;

forall (l in 1..L, mt in 1..MT)
Ankommen:
sum (i in 0..Z) x[i, N, l, mt] == 1;

forall (i in 0..N, j in 0..N, l in 1..L, mt in 1..MT)
ZeitfensterStrecke:
w[i, l, mt] + st[i] + F[i, j] - w[j, l, mt]
<= (1 - x[i, j, l, mt]) * M;

ZeitfensterDepotEnde:
forall (i in {0, N}, l in 1..L, mt in 1..MT)
E >= w[i, l, mt];

```

```

ZeitfensterDepotStart:
forall (i in {0, N}, l in 1..L, mt in 1..MT)
S <= w[i, l, mt];

forall (l in 1..L, mt in 1..MT)
AnschlussauftragZeitlichErreicht:
AZ * aaz[l, mt] >= w[N, l, mt] - (1 - aaz[l, mt]) * M;

forall (l in 1..L, mt in 1..MT)
AnschlussauftragMitEingesetztemFahrzeugErreicht:
aae[l, mt] <= sum (j in 1..Z) x[0, j, l, mt];

forall (l in 1..L, mt in 1..MT)
AnschlussauftragErreicht:
aa[l, mt] <= aaz[l, mt] + aae[l, mt] - 1;

forall (l1 in 1..L, l2 in 1..L, mt in 1..MT)
AbsoluteDifferenzAnkunftszeit1:
    a[l1, l2, mt] >= w[N, l1, mt] - w[N, l2, mt];

forall (l1 in 1..L, l2 in 1..L, mt in 1..MT)
AbsoluteDifferenzAnkunftszeit2:
    a[l1, l2, mt] >= w[N, l2, mt] - w[N, l1, mt];

forall (l1 in 1..L, l2 in 1..L, mt in 1..MT : l1 > l2)
StrafeFuerGleichzeitigesAnkommen:
    a[l1, l2, mt] + ls[l1, l2, mt] >= st[N];

//*** Verknüpfung ***//

forall (i in 1..Z, j in 1..N, l in 1..L, mt in 1..MT)
ErzwingeFahrzeugbewegung:
sum (p in 1..P, t_s in 1..T, t_e in 1..T:(t_s-1) div PL==(mt-1)) \
    tp[i, j, p, l, t_s, t_e] <= x[i, j, l, mt] * M;

```

```

forall (z in 1..Z, j in 0..N, p in 1..P, l in 1..L, t in 1..T, \
      t_e in 1..T)
GeschlosseneProduktion:
tp[z, j, p, l, t, t_e] <= M * (1-r[z, p, t]);

forall (z in 1..Z, l in 1..L, mt in 1..MT, t in 1..T:
      (t-1) div PL==mt-1)
AktivesZeitfensterLieferanten:
wil[z, l, mt, t] * M
>= sum (j in 0..N, p in 1..P, t_e in 1..T)
tp[z, j, p, l, t, t_e];

forall (l in 1..L, mt in 1..MT, t in 1..T:(t-1) div PL==mt-1)
AktivesZeitfensterAbnehmer:
wia[l, mt, t] * M
>= sum (i in 0..N, p in 1..P, t_s in 1..T)
tp[i, N, p, l, t_s, t];

forall (z in 1..Z, l in 1..L, mt in 1..MT, t in 1..T:
      (t-1) div PL==mt-1)
AnfahrzeitpunktLieferanten:
w[z, l, mt] >= ((wil[z, l, mt, t] * t) - (mt-1) * PL) * TL;

forall (l in 1..L, mt in 1..MT, t in 1..T:(t-1) div PL==mt-1)
AnfahrzeitpunktAbnehmer:
w[N, l, mt]
<= ((wia[l, mt, t] * t) - (mt-1) * PL) * TL
+ M * (1 - wia[l, mt, t]);
}

```

A.2. Capacitated Lot Sizing Problem mit Transportrestriktion

Listing A.2: OPL-Modell CLSP-T

```

//*** Parameter ***//

int T = ...; // Perioden
int K[1..T] = ...; // Kapazität
int P = ...; // Produkte
int RZ[1..P] = ...; // Rüstzeiten
int D [1..P, 1..T] = ...; // Bedarfe
int M = 5000; // Big M
float PZ[1..P] = ...; // Produktionszeit
float LK[1..P] = ...; // Lagerkosten
int MinI[1..P] = ...; // Mindestbestand
int MaxI[1..P] = ...; // Maximalbestand

//*** Entscheidungsvariablen ***//

// Lagerbestand
dvar int+ i[1..P, 1..T];
// Losgröße
dvar int+ q[1..P, 1..T];
// Rüstindikator für Periode
dvar boolean ri[1..P, 1..T];

minimize      sum (p in 1..P, t in 1..T) RZ[p] * ri[p, t]
              + LK[p] * i[p, t];

subject to
{
//*** Lagerhaltung ***//

forall (p in 1..P, t in 1..T)
Lagerbestandgleichung:
i[p, t] == i[p, t-1] + q[p, t] - D[p, t];

```

```
forall (p in 1..P)
Anfangsbestand:
i[p, 1] == MinI[p];

forall (p in 1..P, t in 1..T)
Mindestbestand:
i[p, t] >= MinI[p];

forall (p in 1..P, t in 1..T)
Maximalbestand:
i[p, t] <= MaxI[p];

//*** Produktion ***//

forall (p in 1..P, t in 1..T)
Ruestindikator:
q[p,t] <= M * ri[p,t];

forall(t in 1..T)
Kapazitaet:
sum(p in 1..P) (PZ[p] * q[p,t] + RZ[p] * ri[p,t]) <= K[t];

//*** Transport ***//

forall (t in 1..T)
MaximalLKWKomplettladingVolumen:
q[1, t] * V <= KapM3;

forall (t in 1..T)
MaximalLKWKomplettladingGewicht:
q[1, t] * G <= KapKG;
}
```

A.3. Lot Scheduling-Problem

Listing A.3: OPL-Modell LS

```

//*** Parameter ***//

int P = ...;                // Perioden
int A = P;                  // Aktivitäten
float RZ[0..P, 0..P] = ...; // Rüstzeiten
float PZ[0..P] = ...;      // Produktionszeiten
int K = ...;               // Kapazität
int M = ...;              // Big M
int SZ = ...;             // Startzeitpunkt

//*** Entscheidungsvariablen ***//

// Rüstwechsel
dvar boolean ri[0..P, 0..P, 1..A];
// Rüstzustände
dvar boolean r[0..A, 0..P];
// Fertigstellungszeitpunkte
dvar int fs[1..P];
// Zeit
dvar float t[0..A];

minimize      sum(p1 in 0..P, p2 in 0..P, a in 1..A)
              ri[p1, p2, a] * RZ[p1, p2];

subject to
{
//*** Produktion ***//

Kapazitaetsrestriktion:
sum(p in 1..P) PZ[p] + sum(p1 in 1..P, p2 in 1..P, a in 1..A)
ri[p1, p2, a] * RZ[p1, p2] <= K;

```

```
Startzeitpunkt:
t[0] == SZ;

InitialerRuestzustand:
r[0, 0] == 1;

forall (a in 0..A)
EindeutigerJobzustand:
sum(p in 0..P) r[a, p] == 1;

forall (p in 1..P)
JedenZugewiesenenJobEinmalDurchfuehren:
sum(a in 1..A) r[a, p] * M >= PZ[p];

forall (p1 in 0..P, p2 in 0..P, a in 1..A:p1!=p2)
RuestindikatorSetzen:
ri[p1, p2, a] >= r[a, p2] + r[a-1, p1] - 1;

forall (a in 2..A)
KeinRuestsprung:
sum(p in 1..P) ri[p, 0, a] == 0;

forall (a in 1..A)
ZeitFortschreiben:
t[a] == t[a-1] + sum(p1 in 0..P, p2 in 0..P) ri[p1, p2, a]
* RZ[p1, p2] + sum(p in 1..P) r[a, p] * PZ[p];

forall (p in 1..P, a in 1..A)
FertigstellungszeitpunktBestimmen:
fs[p] >= t[a] - M * (1 - r[a, p]);
}
```

A.4. Tourenzuweisungsproblem

Listing A.4: OPL-Modell TC

```

// *** Parameter ***//

int Z = ...; // Lieferanten
int M = ...; // Big M
int L = ...; // Fahrzeuge
float V[1..Z] = ...; // zu transportierendes Volumen
float G[1..Z] = ...; // zu transportierendes Gewicht
int KapM3 = ...; // LKW - Volumenkapazität
int KapKG = ...; // LKW - Gewichtskapazität
float C[1..Z, 1..Z] = ...; // Kraftstoffverbrauch
float KK = ...; // Kraftstoffkosten
float EK = ...; // Emissionskosten

// *** Entscheidungsparameter ***//

dvar boolean x[1..L, 1..Z]; // Fahrzeugbewegung
dvar boolean xc[1..Z, 1..Z]; // Transportcluster

minimize
sum (z1 in 1..Z, z2 in 1..Z) (xc[z1, z2] * C[z1, z2] * (KK+EK));

// Beschränkungen

subject to
{
// *** Transport ***//

forall (l in 1..L)
KapazitaetsrestriktionVolumen:
sum(z in 1..Z) x[l, z] * V[z] <= KapM3;

```

```
forall (l in 1..L)
KapazitaetsrestriktionGewicht:
sum(z in 1..Z) x[l, z] * G[z] <= KapKG;

forall (z1 in 1..Z, z2 in 1..Z, l in 1..L)
Transportcluster:
xc[z1, z2] >= x[l, z1] + x[l, z2] - 1;

forall (z in 1..Z)
AlleLieferndenKnotenAufRouten:
sum (l in 1..L) x[l, z] == 1;
}
```

A.5. Vehicle Routing-Problem mit Zeitfenstern

Listing A.5: OPL-Modell VRPTW

```
// *** Parameter ***//  
int L = ...;  
int N = ...;  
float C[0..N, 0..N] = ...;  
int ST[0..N] = ...;  
float F[0..N, 0..N] = ...;  
int M = ...;  
int E = ...;  
int S = ...;  
int wil[0..N] = ...;  
int KapKG = ...;  
int KapM3 = ...;  
float kg[0..N] = ...;  
float m3[0..N] = ...;  
float KK = ...;  
float EK = ...;  
float FR = ...;  
int FZ = ...;  
int LS = ...;  
int AW = ...;  
int AZ = ...;  
  
// *** Entscheidungsvariablen ***//  
  
dvar boolean x[0..N, 0..N, 1..L];  
dvar int+ w[0..N, 1..L];  
dvar int+ ls[1..L, 1..L];  
dvar boolean aa[1..L];  
dvar boolean aaz[1..L];  
dvar boolean aae[1..L];  
dvar int+ a[1..L, 1..L];  
dvar boolean ai[1..L, 1..L];
```

```

minimize
sum (l in 1..L, i in 0..N, j in 0..N) C[i, j] * (KK + EK)
  * x[i, j, l]
+ sum (l in 1..L) (w[N, l] - w[0, l]) * (FR/60)
+ sum (l in 1..L) (FZ * sum (j in 1..N-1) x[0, j, l])
+ sum (l1 in 1..L, l2 in 1..L) ls[l1, l2] * LS
- sum (l in 1..L) aa[l] * AW;

subject to
{
forall (j in 1..N-1)
AlleKnotenAufRouten:
sum (l in 1..L, i in 0..N:i!=j) x[i, j, l] == 1;

forall (l in 1..L)
Losfahren:
sum (j in 1..N) x[0, j, l] == 1;

forall (j in 1..N-1, l in 1..L)
EinUndAusgehend:
sum (i in 0..N) x[i, j, l] - sum (i in 0..N) x[j, i, l] == 0;

forall (l in 1..L)
Ankommen:
sum (i in 0..N-1) x[i, N, l] == 1;

forall (i in 0..N, j in 0..N, l in 1..L)
ZeitfensterStrecke:
w[i, l] + ST[i] + F[i, j] - w[j, l] <= (1 - x[i, j, l]) * M;

forall (i in 1..N, l in 1..L)
ZeitfensterStart:
wil[i] * sum (j in 0..N) x[i, j, l] <= w[i, l];

ZeitfensterDepotStart:
forall (i in {0, N}, l in 1..L)
E >= w[i, l];

```

```
ZeitfensterDepotEnde:
forall (i in {0, N}, l in 1..L)
S <= w[i, l];

forall (l in 1..L)
KapazitaetKG:
sum (i in 0..N, j in 0..N) kg[i] * x[i, j, l] <= KapKG;

forall (l in 1..L)
KapazitaetM3:
sum (i in 0..N, j in 0..N) m3[i] * x[i, j, l] <= KapM3;

forall (l in 1..L)
AnschlussauftragZeitlichErreicht:
AZ * aaz[l] >= w[N, l] - (1 - aaz[l]) * M;

forall (l in 1..L)
AnschlussauftragMitEingesetztemFahrzeugErreicht:
aae[l] <= sum (j in 1..N-1) x[0, j, l];

forall (l in 1..L)
AnschlussauftragErreicht:
2 * aa[l] <= aaz[l] + aae[l];

forall (l1 in 1..L, l2 in 1..L)
AbsoluteDifferenzAnkunftszeit1:
a[l1, l2] >= w[N, l1] - w[N, l2];

forall (l1 in 1..L, l2 in 1..L)
AbsoluteDifferenzAnkunftszeit2:
a[l1, l2] >= w[N, l2] - w[N, l1];

forall (l1 in 1..L, l2 in 1..L)
AbsoluteDifferenzAnkunftszeit3:
a[l1, l2] <= M * (1 - ai[l1, l2]);
```

```
forall (l1 in 1..L, l2 in 1..L)
AbsoluteDifferenzAnkunftszeit4:
a[l1, l2] <= M * ai[l1, l2];

forall (l1 in 1..L, l2 in 1..L : l1 > l2)
StrafeFuerGleichzeitigesAnkommen:
a[l1, l2] + ls[l1, l2] >= ST[N];
}
```

A.6. Capacitated Lot Sizing Problem mit Tourenplanung

Listing A.6: OPL-Modell CLSP-TC

```

// *** Parameter ***//

int T = ...; // Periods
int K[1..T] = ...; // Kapazität
int P = ...; // Products
int RZ[1..P] = ...; // mittlere Rüstzeit
int Z = ...; // Lieferanten
int DI[1..P, 1..T] = ...; // interner Bedarf
int DE[1..P, 1..T] = ...; // externer Bedarf
int M = ...; // Big M
float PZ[1..P] = ...; // Produktionszeit
float LK[1..P] = ...; // Lagerhaltungskosten
int LP[1..Z, 1..P] = ...; // Produktzuordnung
int N = ...; // Knoten
int L = ...; // Fahrzeuge
int ST[0..N] = ...; // Servicezeit
float F[0..N, 0..N] = ...; // Fahrzeit
float V[1..P] = ...; // Produktvolumen
float G[1..P] = ...; // Produktgewicht
int KapM3 = ...; // LKW - Volumenkapazität
int KapKG = ...; // LKW - Gewichtskapazität
float C[0..N, 0..N] = ...; // Kraftstoffverbrauch
float KK = ...; // Kraftstoffkosten
float FR = ...; // Fahrerkosten
float EK = ...; // Emissionskosten
int MinI[1..P] = ...; // Mindestbestand
int MaxI[1..P] = ...; // Maximalbestand
int I[1..P] = ...; // Indikator internes Teil

```

```
// *** Entscheidungsvariablen ***//

// Lagerbestand
dvar int+ i[1..Z, 1..P, 0..T];

// Losgröße
dvar int+ q[1..Z, 1..P, 1..T];

// Rüstindikator für Periode
dvar boolean ri[1..Z, 1..P, 1..T];

// Materialfluss
dvar int+ tp[1..Z, 1..P, 1..L, 1..T];

// Fahrzeugbewegung
dvar boolean x[1..L, 1..Z, 1..T];

// Transportcluster
dvar boolean xc[1..Z, 1..Z, 1..T];

// Fahrzeugeinsatz
dvar boolean xu[1..L, 1..T];

minimize
sum (z in 1..Z, p in 1..P, t in 1..T) (RZ[p] * ri[z, p, t])
+ sum (z in 1..Z, p in 1..P, t in 1..T) (i[z, p, t] * LK[p])
+ sum (z1 in 1..Z, z2 in 1..Z, t in 1..T) (xc[z1, z2, t] *
    C[z1, z2] * (KK+EK) + xc[z1, z2, t] * F[z1, z2] * FR) / 4;

subject to
{
// *** Lagerhaltung ***//

forall (z in 1..Z, p in 1..P)
Anfangsbestand:
i[z, p, 0] == MinI[p] * LP[z, p];
```

```

forall (z in 1..Z, p in 1..P, t in 1..T)
Lagerbestandsgleichung:
i[z, p, t] == i[z, p, t-1] - DE[p, t] * LP[z, p]
    - DI[p, t] * LP[z, p] + q[z, p, t];

forall (z in 1..Z, p in 1..P, t in 1..T)
Mindestbestand:
i[z, p, t] >= MinI[p] * LP[z, p];

forall (z in 1..Z, p in 1..P, t in 1..T)
Maximalbestand:
i[z, p, t] <= MaxI[p] * LP[z, p];

//*** Produktion ***//

forall (z in 1..Z, p in 1..P, t in 1..T)
Ruestindikator:
q[z, p, t] - M * ri[z, p, t] <= 0;

forall(z in 1..Z, t in 1..T)
Kapazitaet:
sum(p in 1..P) (PZ[p] * q[z, p,t] + RZ[p] * ri[z, p, t]) <= K[t];

forall(z in 1..Z, p in 1..P, t in 1..T)
ZuordnungLieferantProdukt:
ri[z, p, t] <= LP[z, p];

//*** Transport ***//

forall (z in 1..Z, p in 1..P, t in 1..T)
Transportfluss:
sum(l in 1..L) tp[z, p, l, t] == q[z, p, t] * I[p];

forall (l in 1..L, t in 1..T)
KapazitaetsrestriktionVolumen:
sum(z in 1..Z, p in 1..P) (tp[z, p, l, t] * V[p]) <= KapM3;

```

```
forall (l in 1..L, t in 1..T)
KapazitaetsrestriktionGewicht:
sum(z in 1..Z, p in 1..P) (tp[z, p, l, t] * G[p]) <= KapKG;

forall (z1 in 1..Z, z2 in 1..Z, l in 1..L, t in 1..T)
Transportcluster:
xc[z1, z2, t] >= x[l, z1, t] + x[l, z2, t] - 1;

forall (z in 1..Z, t in 1..T)
NurEinLKWProLieferant:
sum(l in 1..L) x[l, z, t] <= 1;

//*** Verknüpfung ***//

forall (z in 1..Z, l in 1..L, t in 1..T)
AlleLieferndenKnotenAufRouten:
sum (p in 1..P) tp[z, p, l, t] <= M * x[l, z, t];
}
```

A.7. Integriertes Tourenplanungs- und Lot Scheduling-Problem

Listing A.7: OPL-Modell IVRLS

```
// *** Parameter ****//

int Z = ...;
int P = ...;
int A = ...;
int LP[1..Z, 1..P] = ...;
float RZ[0..P, 0..P] = ...;
float PZ[0..P] = ...;
int K = ...;
int M = ...;
int I[1..P] = ...;
int L = ...;
int N = Z+1;
float G[1..P] = ...;
float V[1..P] = ...;
int KapKG = ...;
int KapM3 = ...;
int E = ...;
int S = ...;
int ST[0..N] = ...;
float F[0..N, 0..N] = ...;
float C[0..N, 0..N] = ...;
float KK = ...;
float EK = ...;
float FR = ...;
int FZ = ...;
int AZ = ...;
int AW = ...;
int LS = ...;
int VL = ...;
int AN[1..VL] = ...;
int SZ = ...;
```

```

// *** Entscheidungsvariablen ***//

dvar boolean ri[1..Z, 0..P, 0..P, 0..A];
dvar boolean r[1..Z, 0..A, 0..P];
dvar int+ fs[1..Z];
dvar float t[1..Z, 0..A];
dvar boolean x[0..N, 0..N, 1..L];
dvar int+ w[0..N, 1..L];
dvar boolean aa[1..L];
dvar boolean aae[1..L];
dvar boolean aaz[1..L];
dvar int a[1..L, 1..L];
dvar boolean a_abs[1..L, 1..L];
dvar int+ ls[1..L, 1..L];
dvar int a2[1..L, 1..VL];
dvar boolean a2_abs[1..L, 1..VL];
dvar int+ ls2[1..L, 1..VL];
dvar boolean ipi[1..Z, 1..A];

minimize
sum(z in 1..Z, p1 in 0..P, p2 in 0..P, a in 1..A)
  ri[z, p1, p2, a] * RZ[p1, p2]
+ sum (i in 0..N, j in 0..N, l in 1..L)
  C[i, j] * (KK + EK) * x[i, j, l]
+ sum (l in 1..L) (w[N, l] - w[0, l]) * (FR/60)
+ sum (l in 1..L) FZ * sum (j in 1..Z) x[0, j, l]
+ sum (l1 in 1..L, l2 in 1..L) ls[l1, l2] * LS
+ sum (l1 in 1..L, vl in 1..VL) ls2[l1, vl] * LS
- sum (l in 1..L) aa[l] * AW;

subject to
{
// *** Produktion ***//

```

```

forall (z in 1..Z)
Kapazitaetsrestriktion:
sum(p in 1..P, a in 1..A) PZ[p] * r[z, a, p]
+ sum(p1 in 1..P, p2 in 1..P, a in 1..A)
  ri[z, p1, p2, a] * RZ[p1, p2] <= K;

forall (z in 1..Z)
Startzeitpunkt:
t[z, 0] == SZ;

forall (z in 1..Z)
InitialerRuestzustand:
r[z, 0, 0] == 1;

forall (z in 1..Z, a in 1..A)
EindeutigerJobzustand:
sum(p in 0..P) r[z, a, p] == 1;

forall (p in 1..P, z in 1..Z)
JedesTeilBeimRichtigenLieferantenHerstellen:
sum (a in 1..A) r[z, a, p] == LP[z, p];

forall (z in 1..Z, p1 in 0..P, p2 in 0..P, a in 1..A:p1!=p2)
RuestindikatorSetzen:
ri[z, p1, p2, a] >= r[z, a, p2] + r[z, a-1, p1] - 1;

forall (z in 1..Z, a in 2..A)
KeinRuestsprung:
sum(p in 1..P) ri[z, p, 0, a] == 0;

// *** Transport ***//

forall (l in 1..L)
FahrzeugkapazitaetGewicht:
KapKG >= sum(i in 0..N, z in 1..Z, p in 1..P)
  x[i, z, l] * G[p] * LP[z, p];

```

```
forall (l in 1..L)
FahrzeugkapazitaetVolumen:
KapM3 >= sum(i in 0..N, z in 1..Z, p in 1..P)
  x[i, z, l] * V[p] * LP[z, p];

forall (l in 1..L)
Losfahren:
sum (j in 1..N) x[0, j, l] == 1;

forall (z in 1..Z, l in 1..L)
EinUndAusgehend:
sum (i in 0..N) x[i, z, l] - sum (i in 0..N) x[z, i, l] == 0;

forall (l in 1..L)
Ankommen:
sum (i in 0..Z) x[i, N, l] == 1;

forall (i in 0..N, j in 0..N, l in 1..L)
ZeitfensterStrecke:
w[i, l] + ST[i] + F[i, j] - w[j, l] <= (1 - x[i, j, l]) * M;

ZeitfensterDepotEnde:
forall (i in {0, N}, l in 1..L)
E >= w[i, l];

ZeitfensterDepotStart:
forall (i in {0, N}, l in 1..L)
S <= w[i, l];

forall (z in 1..Z)
JedenLieferantenBesuchen:
sum (i in 0..N, l in 1..L) x[i, z, l] * M
  >= sum(p in 1..P, a in 1..A) (r[z, a, p] * I[p]);

forall (z in 1..Z, l in 1..L)
ZeitfensterLieferant:
w[z, l] >= fs[z] - (M * (1 - sum(i in 0..N) x[i, z, l]));
```

```

forall (l in 1..L)
AnschlussauftragZeitlichErreicht:
AZ * aaz[l] >= w[N, l] - (1 - aaz[l]) * M;

forall (l in 1..L)
AnschlussauftragMitEingesetztemFahrzeugErreicht:
aae[l] <= sum (j in 1..N-1) x[0, j, l];

forall (l in 1..L)
AnschlussauftragErreicht:
2 * aa[l] <= aaz[l] + aae[l];

forall (l1 in 1..L, l2 in 1..L)
AbsoluteDifferenzAnkunftszeit1:
a[l1, l2] >= w[N, l1] - w[N, l2];

forall (l1 in 1..L, l2 in 1..L)
AbsoluteDifferenzAnkunftszeit2:
a[l1, l2] >= w[N, l2] - w[N, l1];

forall (l1 in 1..L, l2 in 1..L)
AbsoluteDifferenzAnkunftszeit3:
a[l1, l2] <= (w[N, l2] - w[N, l1]) + M * (1 - a_abs[l1, l2]);

forall (l1 in 1..L, l2 in 1..L)
AbsoluteDifferenzAnkunftszeit4:
a[l1, l2] <= (w[N, l1] - w[N, l2]) + M * a_abs[l1, l2];

forall (l1 in 1..L, l2 in 1..L : l1 > l2)
StrafeFuerGleichzeitigesAnkommen:
a[l1, l2] + ls[l1, l2] >= ST[N];

forall (l in 1..L, vl in 1..VL)
AbsoluteDifferenzAnkunftszeit1C:
a2[l, vl] >= w[N, l] - AN[vl];

```

```
forall (l in 1..L, vl in 1..VL)
AbsoluteDifferenzAnkunftszeit2C:
a2[l, vl] >= AN[vl] - w[N, l];

forall (l in 1..L, vl in 1..VL)
AbsoluteDifferenzAnkunftszeit3C:
a2[l, vl] <= w[N, l] - AN[vl] + M * (1 - a2_abs[l, vl]);

forall (l in 1..L, vl in 1..VL)
AbsoluteDifferenzAnkunftszeit4C:
a2[l, vl] <= w[N, l] - AN[vl] + M * a2_abs[l, vl];

forall (l in 1..L, vl in 1..VL)
StrafeFuerGleichzeitigesAnkommenC:
a2[l, vl] + ls2[l, vl] >= ST[N];

// *** Verknüpfung ***//

forall (z in 1..Z, a in 1..A)
ZeitFortschreiben:
t[z, a] == t[z, a-1]
    + sum(p1 in 0..P, p2 in 0..P) ri[z, p1, p2, a] * RZ[p1, p2]
    + sum(p in 1..P) r[z, a, p] * PZ[p];

forall (z in 1..Z, p in 1..P, a in 1..A)
IndikatorProduktionInternesTeil:
ipi[z, a] * M >= r[z, a, p] + I[p] - 1;

forall (z in 1..Z, a in 1..A)
FertigstellungszeitpunktBestimmen:
fs[z] >= t[z, a] - M * (1 - ipi[z, a]);
}
```


B. XML-Format für Szenarien

Listing B.1: Darstellung des XML-Schemas für Szenarien

```

<xs:schema xmlns="" xmlns:xs="http://www.w3.org/2001/XMLSchema" \
  xmlns:msdata="urn:schemas-microsoft-com:xml-msdata" id="IVRLSP \
  ">
  <xs:element name="IVRLSP" msdata:IsDataSet="true" msdata:\
    UseCurrentLocale="true">
    <xs:complexType>
      <xs:all>
        <xs:element name="Szenario">
          <xs:complexType>
            <xs:sequence>
              <xs:element name="KapazitaetsAuslastung" type="xs:int"/>
              <xs:element name="Planungshorizont" type="xs:int"/>
              <xs:element name="Seed" type="xs:int"/>
              <xs:element name="FahrzeugeProPeriode" type="xs:int"/>
            </xs:sequence>
          </xs:complexType>
        </xs:element>
        <xs:element name="Spediteur">
          <xs:complexType>
            <xs:sequence>
              <xs:element name="KapKG" type="xs:int"/>
              <xs:element name="KapM3" type="xs:int"/>
              <xs:element name="KostenEmissionen" type="xs:double"/>
              <xs:element name="KostenFahrer" type="xs:int"/>
              <xs:element name="KostenFahrzeug" type="xs:int"/>
              <xs:element name="KostenKraftstoff" type="xs:double"/>
              <xs:element name="WertAnschlussauftrag" type="xs:int"/>
            </xs:sequence>
          </xs:complexType>
        </xs:element>
      </xs:all>
    </xs:complexType>
  </xs:element>

```

```
<xs:element name="ZeitfensterAnschlussauftrag" type="xs:\
  int"/>
</xs:sequence>
</xs:complexType>
</xs:element>
<xs:element name="Routinginformationen">
  <xs:complexType>
    <xs:sequence maxOccurs="unbounded">
      <xs:element name="Routinginformation" minOccurs="0" \
        maxOccurs="unbounded">
        <xs:complexType>
          <xs:sequence>
            <xs:element name="Fahrzeit" type="xs:int"/>
            <xs:element name="Kraftstoffverbrauch" type="xs:int"/>
            <xs:element name="Von" type="xs:string"/>
            <xs:element name="Nach" type="xs:string"/>
          </xs:sequence>
        </xs:complexType>
      </xs:element>
    </xs:sequence>
  </xs:complexType>
</xs:element>
<xs:element name="Produkte">
  <xs:complexType>
    <xs:sequence maxOccurs="unbounded">
      <xs:element name="Produkt" minOccurs="0" maxOccurs="\
        unbounded">
        <xs:complexType>
          <xs:sequence>
            <xs:element name="Name" type="xs:string"/>
            <xs:element name="BedarfMittelwert" type="xs:int"/>
            <xs:element name="BedarfVarianz" type="xs:int"/>
            <xs:element name="BOMElement" maxOccurs="unbounded">
              <xs:complexType>
                <xs:sequence>
                  <xs:element name="Teil" type="xs:string"/>
                  <xs:element name="Anzahl" type="xs:int"/>
                </xs:sequence>
              </xs:complexType>
            </xs:element>
          </xs:sequence>
        </xs:complexType>
      </xs:element>
    </xs:sequence>
  </xs:complexType>
</xs:element>
```

```

        </xs:sequence>
    </xs:complexType>
</xs:element>
</xs:sequence>
</xs:complexType>
</xs:element>
</xs:sequence>
</xs:complexType>
</xs:element>
<xs:element name="Standorte">
    <xs:complexType>
        <xs:sequence>
            <xs:element name="Standort" minOccurs="0" maxOccurs="unbounded">
                <xs:complexType>
                    <xs:sequence>
                        <xs:element name="Name" type="xs:string" msdata:Ordinal="0"/>
                        <xs:element name="PositionL" type="xs:double" msdata:Ordinal="1"/>
                        <xs:element name="PositionB" type="xs:double" msdata:Ordinal="2"/>
                        <xs:element name="OppKosten" type="xs:int" minOccurs="0" msdata:Ordinal="3"/>
                        <xs:element name="Servicezeit" type="xs:int" minOccurs="0" msdata:Ordinal="4"/>
                    </xs:sequence>
                    <xs:attribute name="Typ" type="xs:string" use="required"/>
                </xs:complexType>
            </xs:element>
        </xs:sequence>
    </xs:complexType>
</xs:element>
<xs:element name="Teile">
    <xs:complexType>
        <xs:sequence>

```

```
<xs:element name="Teil" minOccurs="0" maxOccurs="unbounded" \
  ">
  <xs:complexType>
    <xs:sequence>
      <xs:element name="Name" type="xs:string" msdata:Ordinal \
        ="0"/>
      <xs:element name="ProdZeit" type="xs:int" msdata: \
        Ordinal="1"/>
      <xs:element name="RuestPosA" type="xs:int" msdata: \
        Ordinal="2"/>
      <xs:element name="RuestPosB" type="xs:int" msdata: \
        Ordinal="3"/>
      <xs:element name="Lieferant" type="xs:string" msdata: \
        Ordinal="4"/>
      <xs:element name="Gewicht" type="xs:int" minOccurs="0" \
        msdata:Ordinal="5"/>
      <xs:element name="Volumen" type="xs:int" minOccurs="0" \
        msdata:Ordinal="6"/>
      <xs:element name="MaxBestand" type="xs:int" minOccurs=" \
        0" msdata:Ordinal="7"/>
      <xs:element name="MinBestand" type="xs:int" minOccurs=" \
        0" msdata:Ordinal="8"/>
      <xs:element name="Lagerkosten" type="xs:int" minOccurs= \
        "0" msdata:Ordinal="9"/>
    </xs:sequence>
    <xs:attribute name="Typ" type="xs:string" use="required" \
      />
  </xs:complexType>
</xs:element>
</xs:sequence>
</xs:complexType>
</xs:element>
</xs:all>
</xs:complexType>
</xs:element>
</xs:schema>
```

Literaturverzeichnis

- [AKD08] ARSHINDER ; KANDA, Arun ; DESHMUKH, S.G.: Supply chain coordination: Perspectives, empirical studies and research directions. In: *International Journal of Production Economics* 115 (2008), Nr. 2, S. 316–335. – ISSN 0925–5273
- [Bau04] BAUDIN, Michel: *Lean Logistics*. Productivity Press, 2004
- [BD09] BRODKORB, Daniel ; DANGELMAIER, Wilhelm: A Concept for Automated Operative Production Planning under Practical Conditions. Proceedings of the 20th National Conference of Australian Society for Operations Research incorporating The 5th International Intelligent Logistics System Conference, 2009
- [BDDE08] BEN-DAYA, M. ; DARWISH, M. ; ERTOGRAL, K.: The joint economic lot sizing problem: Review and extensions. In: *European Journal of Operational Research* 185 (2008), Nr. 2, S. 726 – 742. – ISSN 0377–2217
- [Bec08] BECKMANN, Holger: Lenkung und Planung. In: ARNOLD, Dieter (Hrsg.) ; KUHN, Axel (Hrsg.) ; FURMANS, Kai (Hrsg.) ; ISERMANN, Heinz (Hrsg.) ; TEMPELMEIER, Horst (Hrsg.): *Handbuch Logistik*. Springer-Verlag, 2008
- [Bet88] BETRIEBSWIRTSCHAFTLICHER VERLAG DR. TH. GABLER (Hrsg.): *Gabler Wirtschafts-Lexikon*. 12. Auflage. Wiesbaden: Betriebswirtschaftlicher Verlag Dr. Th. Gabler, 1988
- [BHHS09] BREITER, Andreas ; HEGMANN, Tobias ; HELLINGRATH, Bernd ; SPINLER, Stefan: Coordination in Supply Chain Management - Review and Identification of Directions for Future Research. In: VOSS, Stefan (Hrsg.) ; PAHL, Julia (Hrsg.) ; SCHWARZE, Silvia (Hrsg.): *Logistik Management: Systeme, Methoden, Integration*. Physica-Verlag, 2009, S. 1–35
- [Bie07] BIESENBACH, Andreas: *Multi-Site-Scheduling in der chemischen Industrie*. Deutscher Universitäts-Verlag, 2007
- [BKF⁺04] BUXMANN, Peter ; KÖNIG, Wolfgang ; FRICKE, Markus ; HOLLICH, Franz ; DIAZ, Luis M. ; WEBER, Sascha: *Inter-organizational Cooperation with SAP Solutions*. Springer-Verlag, 2004
- [Bou06] BOUDIA, M.: *Coordination de la planification de la production et de la distribution*. Université de Technologie de Troyes, 2006

- [Bra99] BRATMAN, Michael: *Intention, Plans, and Practical Reason*. City : Center for the Study of Language and Inf, 1999. – ISBN 1575861925
- [Bre08] BRETZKE, Wolf-Rüdiger: *Logistische Netzwerke*. Springer-Verlag, 2008
- [Bre09] BRETZKE, Wolf-Rüdiger: Nachhaltige Logistiksysteme - Anpassungsbedarfe in einer Welt steigender Energiekosten, überlasteter Verkehrswege und rigide bekämpfter Schadstoffemissionen. In: Inderfurth, Karl (Hrsg.) ; Schenk, Michael (Hrsg.) ; Wäscher, Gerhard (Hrsg.) ; Zadek, Hartmut (Hrsg.) ; Ziems, Dietrich (Hrsg.): *Sustainable Logistics*. LOGiSCH, 2009, S. 73–98
- [Buc78] BUCH, A.: *A static economic lot-size model for scheduling production, transportation, and inventories*. 1978
- [Bun08] BUNDESAMT FÜR GÜTERVERKEHR: *Marktbeobachtung Güterverkehr Jahresbericht 2008*. 2008
- [Bus04] BUSCH, Axel: *Kollaborative Änderungsplanung in Unternehmensnetzwerken der Serienfertigung*. HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, 2004
- [Car08] CARDENEO, Andreas: Straßengüterverkehr, Speditionen, Logistik-Dienstleistungen. In: Arnold, Dieter (Hrsg.) ; Kuhn, Axel (Hrsg.) ; Furmans, Kai (Hrsg.) ; Isermann, Heinz (Hrsg.) ; Tempelmeier, Horst (Hrsg.): *Handbuch Logistik*. Springer-Verlag, 2008
- [CCKS98] CAMPBELL, Ann ; CLARKE, Lloyd ; KLEYWEGT, Anton ; SAVELSBERGH, Martin: The Inventory Routing Problem. In: *Fleet Management and Logistics*, Kluwer Academic Publishers, 1998, S. 95–113
- [CF94] CHANDRA, Pankaj ; FISHER, Marshall L.: Coordination of production and distribution planning. In: *European Journal of Operational Research* 72 (1994), S. 503–517
- [Cha93] CHANDRA, Pankaj: A Dynamic Distribution Model with Warehouse and Customer Replenishment Requirements. In: *Journal of the Operational Research Society* 44 (1993), Nr. 7, S. 681–692
- [CHC09] CHEN, Huey-Kuo ; HSUEH, Che-Fu ; CHANG, Mei-Shiang: Production Scheduling and vehicle routing for perishable food products. In: *Computers & Operations Research* 36 (2009), S. 2311–2319
- [CM04] CHOPRA, Sunil ; MEINDL, Peter: *Supply Chain Management: Strategy, Planning and Operations*. Prentice Hall, 2004
- [Dan09] DANGELMAIER, Wilhelm: *Theorie der Produktionsplanung und -steuerung*. Springer-Verlag, 2009
- [DH95] DREXL, Andreas ; HAASE, Knut: Proportional lotsizing and scheduling. In: *International Journal of Production Economics* 40 (1995), S. 73–87
- [Dia05] DIAZ, Luis M.: *Evaluation of Cooperative Planning in Supply Chains*. Deutscher Universitäts-Verlag, 2005

- [DK97] DREXL, A. ; KIMMS, A.: Lot sizing and scheduling - Survey and extensions. In: *European Journal of Operational Research* 99 (1997), S. 221–235
- [DLS90] DESROCHERS, M. ; LENSTRA, J. K. ; SAVELSBERGH, M. W. P.: A classification scheme for vehicle routing and scheduling problems. In: *European Journal of Operational Research* 46 (1990), June, Nr. 3, S. 322–332
- [DMC96] DORIGO, Marco ; MANIEZZO, Vittorio ; COLORNI, Alberto: The Ant System: Optimization by a colony of cooperating agents. In: *IEEE TRANSACTIONS ON SYSTEMS, MAN, AND CYBERNETICS-PART B* 26 (1996), Nr. 1, S. 29–41
- [Dom97] DOMSCHKE, Wolfgang: *Logistik: Rundreisen und Touren*. Oldenbourg, 1997
- [DPR04] DANGELMEIER, Wilhelm ; PAPE, Ulrich ; RÜTHER, Michael: *Agentensysteme für das Supply Chain Management*. Deutscher Universitäts-Verlag, 2004
- [DSV97] DOMSCHKE, Wolfgang ; SCHOLL, Armin ; VOSS, Stefan: *Produktionsplanung*. Springer-Verlag, 1997
- [Dud04] DUDEK, Gregor: *Collaborative Planning in Supply Chains*. Springer-Verlag, 2004
- [DW97] DANGELMAIER, Wilhelm ; WARNECKE, Hans-Jürgen: *Fertigungslenkung*. Springer-Verlag, 1997
- [Efi08] ESSIG, Michael: Vertikale Kooperationen in der Logistik. In: ARNOLD, Dieter (Hrsg.) ; KUHN, Axel (Hrsg.) ; FURMANS, Kai (Hrsg.) ; ISERMANN, Heinz (Hrsg.) ; TEMPELMEIER, Horst (Hrsg.): *Handbuch Logistik*. Springer-Verlag, 2008, S. 981–990
- [Eis02] EISENKOPF, Alexander: Fourth Party Logistics (4PL) ? Fata Morgana oder Logistik-Konzept von Morgen? In: *Wissenschaftssymposium Logistik der BVL*, Huss, 2002
- [Eis08] EISENKOPF, Alexander: Umweltwirkungen logistischer Systeme und Prozesse. In: ARNOLD, Dieter (Hrsg.) ; KUHN, Axel (Hrsg.) ; FURMANS, Kai (Hrsg.) ; ISERMANN, Heinz (Hrsg.) ; TEMPELMEIER, Horst (Hrsg.): *Handbuch Logistik*. Springer-Verlag, 2008, S. 1041–1047
- [EWB98] ERTOGRAL, Kadir ; WU, S. D. ; BURKE, Laura I.: Coordination Production and Transportation Scheduling in the Supply Chain / Department of Industrial and Mfg. Systems Engineering, Lehigh University. 1998. – Forschungsbericht
- [FB07] F. BELLIFEMINE, D. G. G. Caire C. G. Caire: *Developing Multi-Agent Systems with JADE*. Wiley, 2007
- [Fin04] FINK, Andreas: Supply Chain Coordination by Means of Automated Negotiations. In: *Hawaii International Conference on System Sciences* 3 (2004), S. 30070c. – ISSN 1530–1605

- [Fle90] FLEISCHMANN, Bernhard: The discrete lot-sizing and scheduling problem. In: *European Journal of Operational Research* 44 (1990), S. 337–348
- [Fle08] FLEISCHMANN, Bernhard: Grundlagen: Begriffe der Logistik, logistische Systeme und Prozesse. In: ARNOLD, Dieter (Hrsg.) ; KUHN, Axel (Hrsg.) ; FURMANS, Kai (Hrsg.) ; ISERMANN, Heinz (Hrsg.) ; TEMPELMEIER, Horst (Hrsg.): *Handbuch Logistik*. Springer-Verlag, 2008, S. 3–34
- [FM97] FLEISCHMANN, Bernhard ; MEYR, Herbert: The general lotsizing and scheduling problem. In: *OR Spektrum* 19 (1997), S. 11–21
- [FRRS08] FLENDER, Heiko ; RIHA, Iwo ; REINHOLZ, Andreas ; SCHNEIDER, Holger: Transportnetzplanung unter Betrachtung der Kosten-/Nutzenallokation am Beispiel der Versorgungslogistik eines Automobilherstellers / Universität Dortmund. 2008 (08007). – Forschungsbericht
- [FV99] FUMERO, Francesca ; VERCELLIS, Carlo: Synchronized Development of Production, Inventory, and Distribution Schedules. In: *Transportation Science* 33 (1999), S. 330–340
- [Geh07] GEHR, Frank: Netzwerkübergreifende Logistiklösungen entwickeln und realisieren - Die Zielsetzung des Projektes LiNet. In: GEHR, Frank (Hrsg.) ; HELLINGRATH, Bernd (Hrsg.): *Logistik in der Automobilindustrie*. Springer-Verlag, 2007
- [GLPR07] GITTER, Rotraud (Hrsg.) ; LOTZ, Volkmar (Hrsg.) ; PINSDORF, Ulrich (Hrsg.) ; ROSSNAGEL, Alexander (Hrsg.): *Sicherheit und Rechtsverbindlichkeit mobiler Agenten*. Deutscher Universitäts-Verlag, 2007
- [Goy77] GOYAL, S. K.: An integrated inventory model for a single supplier-single customer problem. In: *International Journal of Production Research* 15 (1977), S. 107–111
- [Gra07] GRAF, Hartmut: Innovative Logistics is a Vital Part of Transformable Factories in the Automotive Industry. In: DASHCHENKO, Anatoli I. (Hrsg.): *Reconfigurable Manufacturing Systems and Transformable Factories*. Springer-Verlag, 2007, S. 423–457
- [Gru93] GRUBER, Tom: A translation approach to portable ontology specifications. In: *Knowledge Acquisition* 5 (1993), Nr. 2, S. 199–220
- [GSLWB08] GOSIER, Robert ; SIMCHI-LEVI, David ; WRIGHT, Jonathan ; BENTZ, Brooks A.: *Past the Tipping Point*. Accenture/ILOG White Paper, 2008
- [Gud05] GUDEHUS, Timm: *Logistik*. Springer-Verlag, 2005
- [Hah96] HAHN, Dietgar: Strategische Produktionsplanung. In: *Handwörterbuch der Produktionswirtschaft*. Schäffer-Poeschel, 1996
- [Hal87] HALL, Robert W.: *Attaining Manufacturing Excellence*. McGraw-Hill, 1987

- [Har13] HARRIS, Ford W.: How Many Parts to Make at Once. In: *Factory, The Magazine of Management* 10 (1913), Nr. 2, S. 135–136, 152
- [HB67] HESKETT, J. L. ; BALLOU, R. H.: Logistical Planning in Inter-Organization Systems. In: *Research toward the development of management thought*. Academy of Management, 1967, S. 124–136
- [HB10] HELLINGRATH, Bernd ; BÖHLE, Carsten: Integrierte agentenbasierte Produktions- und Logistikplanung in der Supply Chain. In: *KI - Künstliche Intelligenz* 24 (2010), Nr. 2, S. 115–122
- [HHMT08] HELLINGRATH, Bernd ; HEGMANN, Tobias ; MAASS, Jan-Christoph ; TOTH, Michael: Prozesse in Logistiknetzwerken - Supply Chain Management. In: ARNOLD, Dieter (Hrsg.) ; KUHN, Axel (Hrsg.) ; FURMANS, Kai (Hrsg.) ; ISERMANN, Heinz (Hrsg.) ; TEMPELMEIER, Horst (Hrsg.): *Handbuch Logistik*. Springer-Verlag, 2008
- [Hof95] HOFMANN, C.: *Interdependente Losgrößenplanung in Logistiksystemen*. Verlag für Wissenschaft und Forschung, Stuttgart, 1995
- [HWBB09] HELLINGRATH, Bernd ; WITTHAUT, Markus ; BÖHLE, Carsten ; BRÜGGER, Stephan: An Organizational Knowledge Ontology For Automotive Supply Chains, Springer-Verlag, 2009, S. 37–46
- [Ihm06] IHME, Joachim: *Logistik im Automobilbau*. Hanser Fachbuchverlag, 2006
- [ILO09] *IBM ILOG OPL Interface User's Manual. : IBM ILOG OPL Interface User's Manual*, 2009
- [JD98] JORDAN, Carsten ; DREXL, Andreas: Discrete Lotsizing and Scheduling by Batch Sequencing. In: *Management Science* 44 (1998), S. 698–713
- [JD08] JANS, Raf ; DEGRAEVE, Zeger: Modeling Industrial Lot Sizing Problems: A Review. In: *International Journal of Production Research* 46 (2008), Nr. 6, S. 1619–1643
- [KH02] KUHN, Axel ; HELLINGRATH, Bernd: *Supply Chain Management*. Springer-Verlag, 2002
- [Kim99] KIMMS, A.: Parameter controlled instance generation for lot sizing problems. In: *Central European Journal of Operational Research* 7 (1999), S. 203–223
- [Kin09] *Kapitel Modelling Constructs*. In: KINDLER, Ekkart: *Handbook of Research on Business Process Modeling*. IGI Publishers, 2009, S. 122–141
- [KK08] KIANI-KRESS, Rüdiger: Segen der Langsamkeit. In: *Wirtschaftswoche* (2008), Oktober, Nr. 42, S. 106–111
- [KN08] KANEKO, Jun ; NOJIRI, Wataru: The logistics of Just-in-Time between parts suppliers and car assemblers in Japan. In: *Journal of Transport Geography* 16 (2008), S. 155–173

- [Kno97] KNOPPE, Marc: *Strategische Allianzen in der Kreditwirtschaft*. Oldenbourg, 1997
- [Kri05] KRIEG, Georg: Neue Erkenntnisse zu Andlers Losgrößenformel / Katholische Universität Eichstätt-Ingolstadt. 2005. – Forschungsbericht
- [Kur05] KURBEL, Karl: *Produktionsplanung und -steuerung im Enterprise Resource Planning und Supply Chain Management*. Oldenbourg Verlag, 2005
- [Lei08] LEITAO, Paulo: Agent-based distributed manufacturing control: A state-of-the-artsurvey. In: *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 22 (2008), S. 979–991
- [LMSZ08] LANG, Niels ; MOONEN, Hans M. ; SROUR, F. J. ; ZUIDWIJK, Rob A.: *Multi Agent Systems in Logistics: A Literature and State-of-the-art Review*. 2008
- [LSG05] LETCHFORD, Adam N. ; SALAZAR-GONZALES, Juan-Jose: Projection results for vehicle routing. In: *Mathematical Programming* 105 (2005), S. 251–274
- [Mag81] MAGNANTI, T. L.: Combinatorial optimization and vehicle fleet planning: Perspectives and prospects. In: *Networks* 11 (1981), S. 179–213
- [MCdD06] MOYAU, Thierry ; CHAIB-DRAA, Brahim ; D'AMOURS, Sophie: Supply Chain Management and Multiagent Systems: An Overview. In: CHAIB-DRAA, Brahim (Hrsg.) ; MÜLLER, Jörg P. (Hrsg.): *Multiagent based Supply Chain Management*. Springer-Verlag, 2006, S. 1–28
- [Min09] MINERALÖLWIRTSCHAFTSVERBAND: *Jahresbericht Mineralöl-Zahlen 2008*. Mai 2009
- [MM04] MATTA, Renato de ; MILLER, Tan: Production and inter-facility transportation scheduling for a process industry. In: *European Journal of Operational Research* 158 (2004), S. 72–88
- [Nit06] NITSCHKE, Tanja: Legal Consequences of Agent Deployment. In: KIRN, Stefan (Hrsg.) ; HERZOG, Otthein (Hrsg.) ; LOCKEMANN, Peter C. (Hrsg.) ; SPANIOL, Otto (Hrsg.): *Multiagent Engineering*. Springer-Verlag, 2006, S. 597–618
- [NR03] NORVIG, Peter ; RUSSELL, Stuart: *Artificial Intelligence*. Prentice Hall, 2003
- [ohn40] OHNE AUTOR: River Rouge. In: *Life* (1940), August
- [Ora08] ORACLE: The Shape of Tomorrow's Supply Chains - The Science of Sustainability. 2008. – Forschungsbericht
- [Pan02] PANKRATZ, Giselher: *Speditionelle Transportdisposition*. Deutscher Universitäts-Verlag, Wiesbaden, 2002
- [Pap06] PAPE, Ulrich: *Agentenbasierte Umsetzung eines SCM-Konzeptes zum Liefermanagement in Liefernetzwerken der Serienfertigung*. HNI-Verlagsschriftenreihe, Paderborn, 2006

- [PM08] PECHOUCEK, Michal ; MARIK, Vladimir: Industrial deployment of multi-agent technologies: review and selected case studies. In: *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems* 17 (2008), Nr. 3, S. 397–431
- [Ree95] REEVES, Colin R.: *Modern Heuristic Techniques for Combinatorial Problems*. McGraw-Hill, London, 1995
- [Rot93] ROTERING, Joachim: *Zwischenbetriebliche Kooperation als alternative Organisationsform*. Schäffer-Poeschel, 1993
- [SAP08] SAP AG: *SAP-Geschäftsbericht 2008*. 2008
- [Sau02] SAUER, Jürgen: *Multi-Site Scheduling*, Universität Oldenburg, Diss., 2002
- [Sau04] SAUER, Jürgen: *Intelligente Ablaufplanung in lokalen und verteilten Anwendungsszenarien*. B. G. Teubner Verlag, Wiesbaden, 2004
- [Sch94] SCHMIDT, Joachim: *Die Fahrzeugeinsatzplanung im gewerblichen Güterfernverkehr*. Peter Lang, 1994
- [SHKT99] SADEH, Norman M. ; HILDUM, David W. ; KJENSTAD, Dag ; TSENG, Allen: MASCOT: An Agent-Based Architecture for Coordinated Mixed-Initiative Supply Chain Planning and Scheduling. In: *Workshop on Agent-Based Decision Support in Managing the Internet-Enabled Supply-Chain at Agents 99*, 1999, S. 133–138
- [SM05] SUHL, Leena ; MELLOULI, Taieb: *Optimierungssysteme*. Springer-Verlag, 2005
- [SN99] SARMIENTO, Ana M. ; NAGI, Rakesh: A Review of Integrated Analysis of Production-Distribution Systems. In: *IEE Transactions* 31 (1999), S. 1061–1074
- [Sän04] SÄNGER, Frank: *Elektronische Transportmärkte*. Deutscher Universitäts-Verlag, 2004
- [Sou98] SOUKAL, Rolf: *Kombinierte Bestellmengen- und Tourenplanung*. Cuvillier Verlag, 1998
- [Sou00] SOUREN, Rainer: Umweltorientierte Logistik. In: DYCKHOFF, Harald (Hrsg.): *Umweltmanagement*. Springer-Verlag, 2000, S. 151–168
- [SRBHT07] SCHOLZ-REITER, Bernd ; BÖSE, Felix ; HINRICHS, Uwe ; TOONEN, Christian: Ökologistik - Umweltorientierung in der Logistik. In: *Industrie Management* 23 (2007), S. 15–18
- [SRTW08] SCHOLZ-REITER, Bernd ; TOONEN, Christian ; WINDT, Katja: Logistikdienstleistungen. In: ARNOLD, Dieter (Hrsg.) ; KUHN, Axel (Hrsg.) ; FURMANS, Kai (Hrsg.) ; ISERMANN, Heinz (Hrsg.) ; TEMPELMEIER, Horst (Hrsg.): *Handbuch Logistik*. Springer-Verlag, 2008

- [SSW⁺97] SALOMON, Marc ; SOLOMON, Marius M. ; WASSENHOVE, Luk N. V. ; DUMAS, Yvan ; DAUZERE-PERES, Stephane: Solving the discrete lotsizing and scheduling problem with sequence dependent set-up costs and set-up times using the Travelling Salesman Problem with time windows. In: *European Journal of Operational Research* 100 (1997), S. 494–513
- [Sta09] STADTLER, Hartmut: A framework for collaborative planning and state-of-the-art. In: *OR Spectrum* 31 (2009), Nr. 1, S. 5–30
- [Sto07a] STOMMEL, Herbert: Materialflussplanung und -steuerung - Eine kritische Betrachtung heutiger Materialflussprozesse. In: GEHR, Frank (Hrsg.) ; HELLINGRATH, Bernd (Hrsg.): *Logistik in der Automobilindustrie*. Springer-Verlag, 2007, S. 73–80
- [Sto07b] STOMMEL, Herbert: Prozesssicherung und Kostensenkung in der Transportplanung. In: GEHR, Frank (Hrsg.) ; HELLINGRATH, Bernd (Hrsg.): *Logistik in der Automobilindustrie*. Springer-Verlag, 2007, S. 92–100
- [Sue05] SUERIE, Christopher: *Time Continuity in Discrete Time Models*. Springer-Verlag, 2005
- [SW07] SEIDL, Thomas ; WOLFF, Stefan: Auf dem Weg zu Green Logistics - Messbarkeit ist der Schlüssel. In: *Kongressband zum 24. Deutschen Logistik-Kongress*. Bundesverband Logistik, 2007
- [SWS02] SIMATUPANG, Togar M. ; WRIGHT, Alan C. ; SRIDHARAN, Ramaswami: The knowledge of coordination for supply chain integration. In: *Business Process Management* 8 (2002), Nr. 3, S. 289–308
- [SZ04] SCHNEEWEISS, Christoph ; ZIMMER, Kirstin: Hierarchical coordination mechanisms within the supply chain. In: *European Journal of Operational Research* 153 (2004), Nr. 3, S. 687 – 703. – ISSN 0377–2217
- [Tem06] TEMPELMEIER, Horst: *Materiallogistik*. Springer-Verlag, 2006
- [TV02] TOTH, Paolo ; VIGO, Daniele: *The Vehicle Routing Problem*. Siam, 2002
- [Vah05] VAHRENKAMP, Richard: *Logistik - Management und Strategien*. Oldenbourg, 2005
- [Ver97] VERBAND DER AUTOMOBILINDUSTRIE: *Begriffsbestimmungen im Transport- und Lieferprozeß der Automobilindustrie (VDA-Empfehlung 5002)*. Dezember 1997
- [Ver03a] VERBAND DER AUTOMOBILINDUSTRIE: *Pickup Prozess*. Februar 2003
- [Ver03b] VERBAND DER AUTOMOBILINDUSTRIE: *Vorschläge zur Ausgestaltung logistischer Abläufe (VDA-Empfehlung 5000)*. Oktober 2003
- [Ver08] VERBAND DER AUTOMOBILINDUSTRIE: *Standardbelieferungsformen der Logistik in der Automobilindustrie (VDA-Empfehlung 5010)*. September 2008

- [Ver09] VERBAND DER AUTOMOBILINDUSTRIE: *Jahresbericht 2009*. Juli 2009
- [Völ06] VÖLKL, Stefan: *Zwischenbetriebliche Koordination von Losgrößen in Supply Chains*. Josef Eul Verlag, 2006
- [VW06] VOSS, Stefan ; WOODRUFF, David L.: *Introduction to Computational Optimization Models for Production Planning in a Supply Chain*. Springer-Verlag, 2006
- [Wes07] WESTHAUS, Magnus: *Supply Chain Controlling*. Deutscher Universitäts-Verlag, 2007
- [Wey02] WEYER, Matthias: *Das Produktionssteuerungskonzept Perlenkette und dessen Kennzahlensystem*. Helmesverlag, 2002
- [Wil98] WILDEMANN, Horst: *Die modulare Fabrik*. TCW, 1998
- [Wlc98] WLCEK, Helmut: *Gestaltung der Güterverkehrsnetze von Sammelgutspeditionen*. Gesellschaft für Verkehrsbetriebswirtschaft und Logistik, 1998
- [Woo02] WOOLDRIDGE, Michael: *An Introduction to MultiAgent Systems*. John Wiley & Sons, 2002
- [WRZN06] WOELK, Peer-Oliver ; RUDZIO, Holger ; ZIMMERMANN, Roland ; NIMIS, Jens: Agent.Enterprise in a Nutshell. In: KIRN, Stefan (Hrsg.) ; HERZOG, Otthein (Hrsg.) ; LOCKEMANN, Peter C. (Hrsg.) ; SPANIOL, Otto (Hrsg.): *Multiagent Engineering*. Springer-Verlag, 2006, S. 73–90
- [YTIW06] YUNG, Kai-Leung ; TANG, Jiafu ; IP, Andrew W. H. ; WANG, Dingwei: Heuristics for Joint Decisions in Production, Transportation, and Order Quantity. In: *Transportation Science* 40 (2006), Nr. 1, S. 99–116
- [Zen08] ZENTES, Joachim: Kooperationen in der Distributionslogistik. In: ARNOLD, Dieter (Hrsg.) ; KUHN, Axel (Hrsg.) ; FURMANS, Kai (Hrsg.) ; ISERMANN, Heinz (Hrsg.) ; TEMPELMEIER, Horst (Hrsg.): *Handbuch Logistik*. Springer-Verlag, 2008

