

Selbststeuernde Disposition im Umlaufmanagement von Verleihartikeln

Vom Fachbereich Produktionstechnik der
Universität Bremen
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktor-Ingenieur

genehmigte Dissertation

von
Herrn Dipl.-Inf. Florian Harjes

Erstgutachter: Professor Dr.-Ing. Bernd Scholz-Reiter,
Universität Bremen

Zweitgutachter: Professor Dr.-Ing. Norbert Gronau,
Universität Potsdam

Tag der mündlichen Prüfung: 2016/10/26

Danksagung

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am BIBA, dem Bremer Institut für Produktion und Logistik und im LogDynamics, dem Forschungsschwerpunkt Logistik der Universität Bremen. Mein Dank gilt allen Kollegen und Freunden, die mich in dieser Zeit unterstützt und begleitet haben, sowie den Gutachtern, meiner Familie und meiner Lebensgefährtin.

Zusammenfassung

Das erfolgreiche Agieren auf global ausgerichteten Märkten setzt Unternehmen besonderen Herausforderungen aus. Die zunehmende Ausrichtung an individuellen Kundenwünschen bedingt einen Wandel vom Verkäufer- zum Käufermarkt, während zeitgleich große technische Umwälzungen eine kontinuierliche Anpassung der produktionstechnischen und logistischen Prozesse, sowohl unternehmensintern als auch innerhalb von Unternehmensnetzwerken, erfordern. Die hierzu notwendigen Methoden, Werkzeuge und Technologien sind dementsprechend Gegenstand aktueller Forschungsvorhaben. Die Spanne erstreckt sich hier von der Entwicklung grundlegender Paradigmen für den Umgang mit komplexen und dynamischen Vorgängen über die Integration moderner Informations- und Kommunikationstechnologien (IuK) in industrielle Prozesse, bis hin zu Konzepten für die Implementierung kompletter Produktions- und Logistiksysteme.

Die Mehrzahl der bisher entwickelten Methoden und Werkzeuge hat im akademischen Umfeld vielversprechende Leistungen erzielt, jedoch steht die Evaluation in praxisrelevanten Szenarien in der Regel noch aus. Die vorliegende Arbeit betrachtet Aspekte der Logistik unter dem Paradigma der Selbststeuerung. Hierbei liegt der Fokus auf der kombinierten Anwendung existierender Methoden und Werkzeuge aus dem Bereich der Selbststeuerung und deren Übertragung in die betriebliche Praxis. Als Anwendungsszenario dient die Auftragsdisposition für das Umlaufmanagement von Verleihartikeln in der Veranstaltungslogistik sowie die zugehörige Touren- und Routenplanung innerhalb dynamisch veränderlicher Logistiknetzwerke.

Ergebnis der Arbeit ist ein selbststeuerndes Dispositionssystem, das die beiden Teilprobleme integriert und ressourceneffizient betrachtet. Hierzu werden geeignete Selbststeuerungsmethoden methodisch und technisch für das logistische Anwendungsszenario adaptiert und in einem Modell des Systems zusammengeführt. Die Evaluation der Systemimplementierung betrachtet zwei Ebenen, die direkte Anwendbarkeit auf Basis der Parameter eines Beispielunternehmens sowie die Skalierbarkeit der entwickelten Lösung anhand fiktiver Szenarien.

Die erreichten Resultate zeigen, dass der entwickelte Ansatz in der Lage ist, die Disposition für das Praxisbeispiel und für die fiktiven Szenarien zuverlässig

durchzuführen. Eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung auf Basis der erreichten Dispositionsergebnisse und der zu erwarteten Einführungs- und Implementierungskosten lässt darauf schließen, dass eine Amortisation durch die gesteigerte Ressourceneffizienz vorrangig für die größeren Szenarien gegeben ist, da das Beispielunternehmen die kritische Masse für einen gewinnbringenden Einsatz von Selbststeuerungsmethoden im Hinblick auf Auftragsmenge und -volumen nicht ganz erreicht.

Abstract

Being successful within global markets is a challenging task. Individual customer requirements induce a change from a seller-oriented towards a customer-oriented market. At the same time, technical advances lead to a continuous adaption of production and logistic processes, both within individual companies and global networks.

Therefore, the required methods, tools and technologies are subject to manifold current research projects. At this, the efforts reach from the development of new paradigms for the handling of complex and dynamic processes over the integration of modern information and communication technologies up to concepts for the implementation of complete production and logistic systems. Yet, the majority of existing methods and tools show a good performance in academic scenarios, but often lack an evaluation in practice. The presented work considers autonomous control in logistics. At this, the combined application of methods and tools from this field in a practice-oriented scenario is from central interest. The order disposition for rental articles within event logistics and the related route planning serve as the application scenario.

Result of the presented work is an autonomously controlled distribution system for the integrated and efficient consideration of both sub-problems. For this purpose, an adaptation and combination of several suitable autonomous control methods takes place. Further, the modified methods are brought together into a system model and implemented. The subsequent evaluation considers two levels, the direct applicability in an example company and the scalability by means of fictional scenarios.

The results show a reliable and efficient disposition for both the example company and for the fictional scenarios. A profitability analysis basing on the expected costs for the implementation and introduction implies the amortisation primarily for the larger scenarios. At this, the example company seems to miss the critical mass for the advantageous application of autonomous control regarding the order number and volume.

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Zielstellung	2
1.3	Aufbau der Arbeit	4
2	Grundlagen	5
2.1	Auftragsdisposition	5
2.1.1	Organisatorische Einordnung	6
2.1.2	Dispositionsarten	7
2.2	Touren- und Routenplanung	8
2.2.1	Das Traveling Salesman Problem	8
2.2.2	Das Pickup and Delivery Problem	10
2.2.3	Das Vehicle Routing Problem	12
2.3	Selbststeuerung	13
2.4	Autonomous Logistics Engineering Methodology (ALEM)	15
2.4.1	ALEM-Notation	16
2.4.2	ALEM-Procedure	18
2.4.3	ALEM-Tool	20
2.5	Platform for Simulation with Multiple Agents (PlaSMA)	22
2.5.1	PlaSMA - Ontologien	22
2.5.2	Anwendungsgebiete	24
2.6	Distributed Logistics Routing Protocol (DLRP)	25
2.6.1	Grundprinzipien	26

2.6.2	Algorithmus des DLRP	28
2.6.3	Varianten des DLRP	30
3	Anwendungsszenario	33
3.1	Veranstaltungslogistik	33
3.2	Praxisfall	34
3.3	Anforderungen an das Distributionssystem	37
4	Konzeptentwicklung und Implementierung	40
4.1	Ist-Prozessaufnahme	40
4.1.1	Veranstaltungsdurchführung	40
4.1.2	Prozessschwachstellen	43
4.2	Soll-Konzept	45
4.2.1	Selbststeuernde Disposition	46
4.2.2	Informationstransparenz	48
4.3	ALEM-Modell	52
4.3.1	Ziele	52
4.3.2	Struktur	54
4.3.3	Fähigkeiten	55
4.3.4	Prozesse	57
4.3.5	Entscheidungen	64
4.3.6	Wissen	67
4.3.7	Kommunikation	68
4.3.8	Szenario	74
4.4	Simulation mit PlaSMA	75
4.4.1	Szenariogenerierung	76
4.4.2	Simulation	84
4.4.3	Ausgabe der Planungsergebnisse	86
4.5	Touren- und Routenplanung mit dem DLRP	90
4.6	Systemarchitektur	96
4.6.1	Systemkomponenten	96
4.6.2	Systemintegration	97
5	Evaluation	107
5.1	Labortests des Hardwaremoduls	107

5.2	Logistische Leistungsfähigkeit	114
5.2.1	Szenariogrößen	115
5.2.2	Referenzansätze	117
5.2.3	Experimentelle Ergebnisse	120
5.3	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	146
5.3.1	Einführung im Ist-Zustand	146
5.3.2	Einführung in größerem Unternehmen	152
6	Fazit und Ausblick	155
A	Zusätzliches Material (Appendix)	157
A.1	Ergänzungen zu Kapitel 2	158
A.2	Ergänzungen zu Kapitel 4	159
A.2.1	Ist-Prozessaufnahme	159
A.2.2	ALEM: Zieldefinition	167
A.2.3	ALEM: Fähigkeiten	169
A.2.4	ALEM: Prozesse	172
A.2.5	ALEM: Wissenslandkarte	179
A.2.6	ALEM: Kommunikation	180
A.2.7	Konfiguration der Schnittstelle zur Datenbank	181
A.3	Ergänzungen zu Kapitel 5	184
A.3.1	Testaufbauten	186
A.3.2	Bestimmung der Laderichtung	191
A.3.3	Simulationsergebnisse	193

Abbildungsverzeichnis

2.1	Organisationsebenen nach Gudehus [26]	6
2.2	Ein einfaches Traveling Salesman Problem nach [36]	9
2.3	Ein dynamisches PDP-Problem [37]	11
2.4	Grad der Autonomie in selbststeuernden Systemen [4]	14
2.5	ALEM-Sichten nach [71]	17
2.6	ALEM-Procedure nach [9, 14]	19
2.7	Aufbau von ALEM-T [78]	21
2.8	Ontologien in PlaSMA [21]	23
2.9	Modellierung in PlaSMA am Beispiel von Agenten [21]	24
2.10	Die fünf Grundprinzipien des DLRP [87]	26
2.11	Die Objekttypen des DLRP [87]	28
2.12	Schematische Vorgehensweise des DLRP [88]	29
4.1	Phasen der Veranstaltungsausführung nach [18]	41
4.2	Prozessuale Schwachstellen im Beispielunternehmen [18, 93, 97]	44
4.3	Ansatzpunkte des selbststeuernden Soll-Prozesses [95, 97, 102]	46
4.4	Ablauf des selbststeuernden Soll-Prozesses nach [95, 97]	47
4.5	Schematische Darstellung des Hardwaremoduls zur Informationserfassung [99, 102]	51
4.6	Globale Ziele des selbststeuernden Dispositionssystems	52
4.7	Zuordnung des Ziels der Zumietungsreduktion zu Verleiharti- keln und Transportfahrzeugen	53
4.8	Stukturdiagramm des selbststeuernden logistischen Systems	54
4.9	Fähigkeiten des selbststeuernden Objekts Veranstaltungsartikel	55
4.10	Fähigkeiten des selbststeuernden Objekts Fahrzeug	56
4.11	Lebenszyklus eines Artikels	58
4.12	“Virtueller“ Lebenszyklus eines Artikels	60

4.13	Lebenszyklus eines Transportmittels	61
4.14	“Virtueller“ Lebenszyklus eines Transportmittels	62
4.15	Prozess der Artikelauswahl für eine Veranstaltung	63
4.16	Elemente einer Entscheidung nach [9] und [73]	65
4.17	Entscheidung des logistischen Objekts Fahrzeug	66
4.18	Wissensklassen des selbststeuernden Dispositionssystems	67
4.19	Nachrichtenklassen des selbststeuernden Dispositionssystems	69
4.20	Nachrichtenaustausch eines Objektes aus der Klasse Artikel	70
4.21	Nachrichtenaustausch der Klasse Fahrzeuge	71
4.22	Nachrichtensequenzen zwischen den koordinativen Agenten	73
4.23	Prinzip der rollierenden Neuplanung, angelehnt an [37]	75
4.24	Abbildung auf ein Simulationsmodell [104]	77
4.25	Ausschnitt aus der Datenbank mit Veranstaltungsorten	82
4.26	Ausschnitt aus der Datenbank mit Strecken zwischen Veranstaltungen	83
4.27	Ausgabebeispiel für eine Veranstaltung	87
4.28	Ausgabebeispiel für einen Artikel	88
4.29	Ausgabebeispiel für ein Fahrzeug	89
4.30	Vorgehen bei der Tourenplanung	93
4.31	Komponenten des Dispositionssystems [99]	97
4.32	Integration des Hardwaremoduls in die Ladeprozesse am Veranstaltungsort	98
4.33	Vorgehen zur technischen Integration des Hardwaremoduls	99
4.34	Prozessuale Veränderungen durch die Integration des selbststeuernden Dispositionssystems	101
4.35	Vorgehen des Disponenten in Abhängigkeit von der technischen Umsetzung der Softwareintegration	102
4.36	Vorgehen zur technischen Integration des Softwareparts	103
4.37	Gesamtarchitektur des Dispositionssystems [100]	104
5.1	Ausrichtung der RFID-Antenne und der Bewegungsmelder [93, 102]	109
5.2	Schema der Versuchsdurchführung [102]	110
5.3	Testergebnis für einen Beladeprozess	111

5.4	Testergebnis für einen Beladeprozess mit Objekten im Erfassungsbereich	112
5.5	Ergebnisse des ersten Settings mit fünf Veranstaltungen in Szenario 1	122
5.6	Ergebnisse des zweiten Settings mit fünf Veranstaltungen in Szenario 1	124
5.7	Ergebnisse des ersten Settings mit 20 Veranstaltungen in Szenario 1	127
5.8	Teil 1 der Ergebnisse des zweiten Settings mit 20 Veranstaltungen in Szenario 1	129
5.9	Teil 2 der Ergebnisse des zweiten Settings mit 20 Veranstaltungen in Szenario 1	130
5.10	Teil 1 der Ergebnisse des ersten Settings mit 25 Veranstaltungen in Szenario 1	133
5.11	Teil 2 der Ergebnisse des ersten Settings mit 25 Veranstaltungen in Szenario 1	134
5.12	Erster Teil der Ergebnisse des zweiten Settings mit 25 Veranstaltungen in Szenario 2	136
5.13	Zweiter Teil der Ergebnisse des zweiten Settings mit 25 Veranstaltungen in Szenario 2	137
5.14	Teil 1 der Ergebnisse des ersten Settings mit 50 Veranstaltungen in Szenario 2	139
5.15	Teil 2 der Ergebnisse des ersten Settings mit 50 Veranstaltungen in Szenario 2	140
5.16	Teil 1 der Ergebnisse des zweiten Settings mit 50 Veranstaltungen in Szenario 2	142
5.17	Teil 2 der Ergebnisse des zweiten Settings mit 50 Veranstaltungen in Szenario 2	143
A.1	ALEM-Sichten nach [8], Ergänzung zu Kapitel 2.4	158
A.2	Phase 1 der Veranstaltungsplanung	159
A.3	Phase 2 der Veranstaltungsplanung	160
A.4	Phase 3 der Veranstaltungsplanung	161
A.5	Phase 4 der Veranstaltungsplanung	162
A.6	Phase 5.1 der Veranstaltungsplanung	163

A.7	Phase 5.2 der Veranstaltungsplanung	164
A.8	Phase 5.3 der Veranstaltungsplanung	165
A.9	Phase 6 der Veranstaltungsplanung	166
A.10	Teilziel höhere Auslastung für Verleihartikel	167
A.11	Teilziel höhere Auslastung für die Mitarbeiter	167
A.12	Teilziel höhere Auslastung der Transportmittel	168
A.13	Fähigkeiten der Objekte in der Klasse Komponenten	169
A.14	Fähigkeiten der Klasse ComponentManager	170
A.15	Fähigkeiten der Klasse ArticleManager	171
A.16	Fähigkeiten der Klasse FleetManager	171
A.17	Fähigkeiten der Klasse ListManager	171
A.18	Lebenszyklus des ArticleManagers	172
A.19	Lebenszyklus des ComponentManagers	173
A.20	Lebenszyklus des FleetManagers	173
A.21	Lebenszyklus des ListManagers	174
A.22	Der Prozess Artikelanfrage	175
A.23	Prozess der Fahrzeugauswahl	176
A.24	Prozess der Routenplanung in Anlehnung an das DLRP	176
A.25	Virtueller Lebenszyklus eines Mitarbeiters	177
A.26	Physischer Lebenszyklus eines Mitarbeiters	177
A.27	Prozess der Personalauswahl für eine Veranstaltung	178
A.28	Lebenszyklus des EmployeeManagers	178
A.29	Wissenslandkarte des selbststeuernden Dispositionssystems	179
A.30	Nachrichtenaustausch der Klasse Komponenten	180
A.31	Auszug aus der Inventuransicht der EasyJob Datenbank	182
A.32	Roll Cases unterschiedlicher Größe	184
A.33	Roll Case offen	184
A.34	Bündel Stühle auf Ladungsträger	185
A.35	Testobjekt Rollwagen	186
A.36	Ladebereiche	186
A.37	Ladebereich mit Modulposition und Maßen	187
A.38	Szenario 1, Leseradius außen	187
A.39	Szenario 2, Leseradius innen	188
A.40	Szenario 3, Leseradius außen mit Objekten in Reichweite	188

A.41 Szenario 4, Leseradius innen mit Objekten im Fahrzeug	189
A.42 Szenario 5, Leseradius außen mit Objekten im Fahrzeug	189
A.43 Szenario 6, Leseradius innen mit Objekten in Reichweite	190
A.44 Szenario 7, Vorbeiführen von Objekten am Fahrzeug (Vermeidung von Fehlerfassungen)	190
A.45 Bestimmung der Laderichtung aus RFID-Erkennung und Bewegungsdetektion	191
A.46 Ergebnisübersicht für die Simulationsstudien, Teil 1	194
A.47 Ergebnisübersicht für die Simulationsstudien, Teil 2	195
A.48 Ergebnisübersicht für die Simulationsstudien, Teil 3	196
A.49 Ergebnisübersicht für die Simulationsstudien, Teil 4	197
A.50 Ergebnisübersicht für die Simulationsstudien, Teil 5	198

Tabellenverzeichnis

2.1	Auswahl von Varianten des TSP	10
2.2	Auswahl von Varianten des VRP	12
3.1	Teilprobleme und selbststeuernde Lösungsansätze [99]	38
4.1	Ausstattung des Hardwaremoduls [93]	49
5.1	Testszenarien für das Hardwaremodul	108
5.2	Testergebnisse in den Ladeszenarien und bei der Vermeidung von Fehlerkennungen	113
5.3	Parameter der beiden betrachteten Szenarien	116
5.4	Parameter der Settings für Szenario 1	121
5.5	Parameter der Settings für Szenario 2	132
5.6	Mögliche Einsparungen durch den Einsatz der selbststeuernden Disposition	147
5.7	Aufwandsabschätzung für die Eigenentwicklung und Einführung der selbststeuernden Disposition	149
5.8	Aufwandsabschätzung für die Entwicklung und Einführung der selbststeuernden Disposition im Falle einer Auftragsentwicklung	151
5.9	Mögliche Einsparungen durch den Einsatz der selbststeuernden Disposition (bei Fremdvergabe)	152
5.10	Kosten für Eigenentwicklung und Fremdvergabe im größeren Anwendungsfall	153

Abkürzungsverzeichnis

ALEM	Autonomous Engineering Logistics Methodology
AuDiRea	Autonomous Distribution of Rental Articles
BTO	Build-to-Order
CVRP	Capacitated Vehicle Routing Problem
DCVRP	Distance Constrained Vehicle Routing Problem
DLRP	Distributed Logistics Routing Protocol
DLRP_t	Distributed Logistics Routing Protocol Transportlogistik
DLRP_p	Distributed Logistics Routing Protocol Produktion
DMVPDPTW	Dynamic Multi Vehicle PDP with Time Windows
DTD	Dokumenttypdefinition
EMF	Eclipse Modelling Framework
ERP	Enterprise Resource Planning
FCFS	First come, First served
FIPA	Foundation for Intelligent Physical Agents
FTP	File Transfer Protocol
GMF	Graphical Modelling Framework
GPS	Global Positioning System
IuK	Information und Kommunikation
JADE	Java Agent Development Framework
KMU	Kleines oder Mittelständisches Unternehmen
MAS	Multi Agent System
MOTSP	Multiple Online Traveling Salesman Problem
MTSP	Multiple Traveling Salesman Problem
MDE	Mobile Data Entry
OWL	Web Ontology Language
PDP	Pickup and Delivery Problem
PDPTW	Pickup and Delivery Problem with Time Windows
PlaSMA	Platform for Simulation with Multiple Agents
RCP	Rich Client Platform
RFID	Radio Frequency Identification
RRA	Route Announcement

RDA	Route Disannouncement
RRP	Route Reply
RRQ	Route Request
TSP	Traveling Salesman Problem
NFC	Near Field Communication
UMTS	Universal Mobile Telecommunication System
UML	Unified Modeling Language
USB	Universal Serial Bus
VNS	Variable Neighborhood Search
VRP	Vehicle Routing Problem
VRPB	Vehicle Routing Problem with Backhauls
VRPBTW	Vehicle Routing Problem with Backhauls and Time Windows
VRPTW	Vehicle Routing Problem with Time Windows
VRPPDP	Vehicle Routing Problem with Pickup and Delivery
VRPPDPTW	VRP with Pickup, Deliveries and Time Windows
WLAN	Wireless Local Area Network
XML	Extensible Markup Language

Kapitel 1

Einführung

1.1 Motivation

In der heutigen Zeit ist unternehmerischer Erfolg häufig eng mit der Fähigkeit verknüpft, Kunden weltweit individuelle, auf ihre persönlichen Wünsche und Bedürfnisse abgestimmte Produkte anbieten zu können [1]. Diese Entwicklung hat kürzere Produktlebenszyklen und oftmals geringe Losgrößen zur Folge, so dass einer flexiblen und zeitnahen Anpassung der Produktions- und Logistikprozesse an neue Produktarten und -varianten sowie einer kontinuierlichen Integration neuer Technologien und Methoden eine große Bedeutung zukommt. In dieser Hinsicht stehen moderne Informations- und Kommunikationstechnologien (IuK), deren zunehmende Verwendung in industriellen Prozessen die Grundlage neuer Herangehensweisen für den Umgang mit Komplexität und Dynamik darstellt, besonders im Fokus [2].

Das Paradigma der Selbststeuerung definiert vor diesem Hintergrund einen Methodenkomplex, der auf einer Verschiebung der Entscheidungskompetenz weg von zentralen Instanzen, hin zu autonomen Objekten in Produktions- und Logistiksystemen basiert. Grundgedanke der Selbststeuerung ist es, unter Zuhilfenahme von IuK-Technologien prozessrelevante Objekte mit der notwendigen Intelligenz zum Treffen autonomer Entscheidungen zu versehen, um durch eine dezentrale Entscheidungsfindung komplexe und dynamische Situationen besser bewältigen zu können [3, 4]. Zielsetzung ist eine Erhöhung der Robustheit und Zielerfüllung in heterarchischen Produktions- und Logistiksystemen [2].

Dementsprechend stand der Gedanke der Selbststeuerung in den vergangenen Jahren im Mittelpunkt zahlreicher Forschungsaktivitäten [5]. Diese reichen von der Entwicklung grundlegender Methoden und Werkzeuge [6] über die technischen Aspekte der Integration von IuK-Technologien [7] bis hin zu umfangreichen Modellierungskonzepten für komplexe selbststeuernde Prozesse [8, 9]. Aufbauend auf diesen grundlagenorientierten Arbeiten sind erste Referenzanlagen entstanden, die das Potential der Selbststeuerung in anwendungsorientierten Szenarien demonstrieren [10, 11, 12, 13].

Der letzte Schritt über die beispielhafte Anwendung zu Demonstrationszwecken hinaus in die industrielle Praxis hat jedoch noch nicht stattgefunden. Auf diesen Praxistransfer zielt die vorliegende Arbeit ab.

1.2 Zielstellung

Bisher fokussieren existierende Methoden und Werkzeuge aus dem Bereich der Selbststeuerung jeweils getrennt verschiedene Teilaspekte von Produktions- und Logistiksystemen. Im Mittelpunkt stehen beispielsweise Vorgehensweisen für die Konzeptionierung [14] und Implementierung selbststeuernder Systeme [15, 16], die Modellierung entscheidungsfähiger autonomer Objekte sowie technische Fragen hinsichtlich der Vernetzung, der Informationsakquise oder des Datenaustauschs [17]. Ein erfolgreicher Transfer in die praktische Anwendung bedingt jedoch eine Zusammenführung der einzelnen Methoden und Werkzeuge im Rahmen eines realen Szenarios.

Hieraus ergibt sich die Forschungsfrage nach der Anwendbarkeit, Leistungsfähigkeit und Wirtschaftlichkeit von Selbststeuerungsmethoden und zugehörigen Werkzeugen unter Praxisbedingungen. Um diese Frage zu beantworten, betrachtet die vorliegende Arbeit als Forschungsaufgabe die Konzeption und Implementierung eines selbststeuernden Dispositionssystems für das Umlaufmanagement von Verleihartikeln. Als übergeordnetes Anwendungsszenario dient das Geschäftsfeld der Veranstaltungslogistik, die detaillierten Rahmenbedingungen sind einem konkreten Praxisfall entnommen [18]. Das entwickelte Dispositionssystem verfolgt einen dezentralen Planungsansatz im Sinne einer selbststeuernden Allokation aller relevanten Ressourcen, einschließlich der Touren- und Routenplanung. Der zentrale Ansatzpunkt für die Umsetzung

dieses Vorhabens ist die Konzeption und Implementierung eines selbststeuernden Sollprozesses für die Veranstaltungslogistik, der sowohl den allgemeinen Gegebenheiten des Anwendungsszenarios, als auch den charakteristischen Anforderungen des Praxisfalls gerecht wird. Zur Erreichung dieses Ziels kommen die folgenden drei Methoden aus dem Bereich der Selbststeuerung, bzw. deren Implementierung als Softwarewerkzeuge zum Einsatz.

- **Autonomous Engineering Logistics Methodology (ALEM)**

ALEM stellt eine Modellierungsmethode für selbststeuernde logistische Prozesse dar [8]. In dieser Eigenschaft findet es Anwendung bei der Modellierung der Soll-Prozesse, insbesondere für die Abbildung der involvierten Teilkomponenten des Dispositionssystems als autonome, selbststeuernde Objekte.

- **Distributed Logistics Routing Protocol (DLRP)**

Das DLRP wurde konzipiert, um logistischen Objekten ein selbststeuerndes Routing durch dynamische Netzwerke zu ermöglichen [19]. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit kommt das DLRP für die Realisierung der Touren- und Routenplanung in den dynamisch veränderlichen Netzwerken der Veranstaltungsorte zur Anwendung.

- **Platform for Simulation with Multiple Agents (PlaSMA)**

PlaSMA wurde für die agentenbasierte Simulation großer logistischer Systeme mit einer Vielzahl von autonomen Entitäten entwickelt [20, 21]. PlaSMA stellt den Kern des in dieser Arbeit entwickelten Distributionssystems dar.

Um die Forschungsfrage nach der Leistungsfähigkeit des Distributionssystems beantworten zu können, wird ergänzend zur Konzeption und Implementierung eine Evaluation, bzw. ein Benchmarking durchgeführt. Dies geschieht im Rahmen von Labortests und Simulationsstudien, um sowohl die Zielerfüllung im allgemeinen Rahmen der Veranstaltungslogistik, als auch im Hinblick auf die Anforderungen des Praxisfalls bewerten zu können. Als Maßstab dient der Vergleich zum Ist-Zustand, bzw. die Evaluation relevanter logistischer Kennzahlen. Den Abschluss der Evaluation bildet eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung des Systems im Hinblick auf die Amortisationsdauer und die Auswirkung der erzielten Auslastungsgrade relevanter Ressourcen auf die Kapitalbindung.

1.3 Aufbau der Arbeit

Im Anschluss an Motivation und Zielstellung in Kapitel 1 beleuchtet das Kapitel 2 die dem Anwendungsszenario der Veranstaltungslogistik zugrundeliegenden Teilprobleme Disposition und Tourenplanung. Ferner wird das Konzept der Selbststeuerung detailliert betrachtet und darauf aufbauend eine Einführung in die für diese Arbeit zentralen Selbststeuerungsmethoden ALEM, DLRP und PlaSMA gegeben.

Das Anwendungsszenario der Veranstaltungslogistik, die darauf aufbauenden Charakteristika des Praxisfalls und die hieraus abgeleiteten Anforderungen an das Dispositionssystem werden in Kapitel 3 behandelt. Die Aufnahme der Ist-Prozesse und die Konzeption des selbststeuernden Soll-Prozesses findet in Kapitel 4 statt. Weiterhin beinhaltet dieses Kapitel die Modellierung des Dispositionssystems mittels ALEM, die notwendige Adaption der Simulationsumgebung PlaSMA und die Anbindung des DLRP.

Die Evaluation des implementierten Gesamtsystems ist Inhalt von Kapitel 5. Hier werden die Testbedingungen sowie die Ergebnisse der Labortests für die Hard- und Softwarekomponenten vorgestellt und darauf aufbauend die logistische Leistungsfähigkeit des Distributionssystems beurteilt. Den Abschluss des Kapitels bildet die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung. Das Kapitel 6 beschließt die Arbeit, es fasst die Ergebnisse zusammen und gibt einen Ausblick auf mögliche weiterführende Forschungsarbeiten.

Kapitel 2

Grundlagen

Aus wissenschaftlicher Perspektive berührt die Konzeption und Implementierung eines selbststeuernden Distributionssystems mit angegliederter Touren- und Routenplanung drei Themenkomplexe. Dies sind die Disposition von Aufträgen und Ressourcen, die Planung von Routen und passenden Touren sowie das Paradigma der Selbststeuerung [18]. Die ersten drei Abschnitte des Kapitels befassen sich jeweils mit einem der Themenkomplexe, geben eine kurze Einführung und legen den aktuellen Stand der Technik in Wissenschaft und Forschung dar. In den folgenden Abschnitten werden die drei dem Dispositionssystem zugrundeliegenden Selbststeuerungsmethoden ALEM, PlaSMA und das DLRP eingeführt.

2.1 Auftragsdisposition

Unter dem Begriff Auftragsdisposition wird allgemein die terminabhängige Zuweisung von Ressourcen an vorliegende Aufträge verstanden [22, 23]. Diese Aufträge werden von externen Auftraggebern erteilt und sind Auslöser der für ihre Erfüllung notwendigen Vorgänge innerhalb eines Unternehmens [24]. In diesem Zusammenhang umfasst die Disposition die entsprechende Ableitung interner Aufträge und die zugehörige Abstimmung von Transport- und Fertigungsvorgängen unter Berücksichtigung möglicher externer Logistikprozesse [25]. Dieses Auflösen externer Aufträge und die korrespondierende Zuweisung von Teilaufgaben an interne Leistungsbereiche verfolgt das Ziel einer Erfüllung der Auftragsanforderungen bei kostenoptimaler Auslastung der verfügbaren

Ressourcen und stellt die Kernaufgabe der Auftragsdisposition dar [26]. Der Fokus der vorliegenden Arbeit auf das Umlaufmanagement von Verleihartikeln impliziert eine Einschränkung dieses allgemeinen Dispositionsbegriffs. Da Verleihartikel umlaufende Gebrauchsgüter darstellen, bedingt die Auftragsdisposition in diesem Zusammenhang keine Fertigungsaufträge, so dass keine Fertigungsdisposition notwendig ist. Weiterhin findet ein Bestellmanagement nur im Zusammenhang mit Neuanschaffungen statt. Dementsprechend berücksichtigen die folgenden Ausführungen nur diejenigen Aspekte der Auftragsdisposition, die für eine Ressourcenallokation in den logistischen Kreislaufprozessen des Anwendungsszenarios und somit für die Forschungsaufgabe und die Beantwortung der gestellten Forschungsfragen von Bedeutung sind.

2.1.1 Organisatorische Einordnung

Legt man eine hierarchische Unternehmensstruktur zugrunde, so ist die Ressourcenzuweisung auf der dispositiven Ebene angesiedelt (Abbildung 2.1). Hier werden die auf der administrativen Ebene von der Unternehmensleitung getroffenen Entscheidungen umgesetzt.

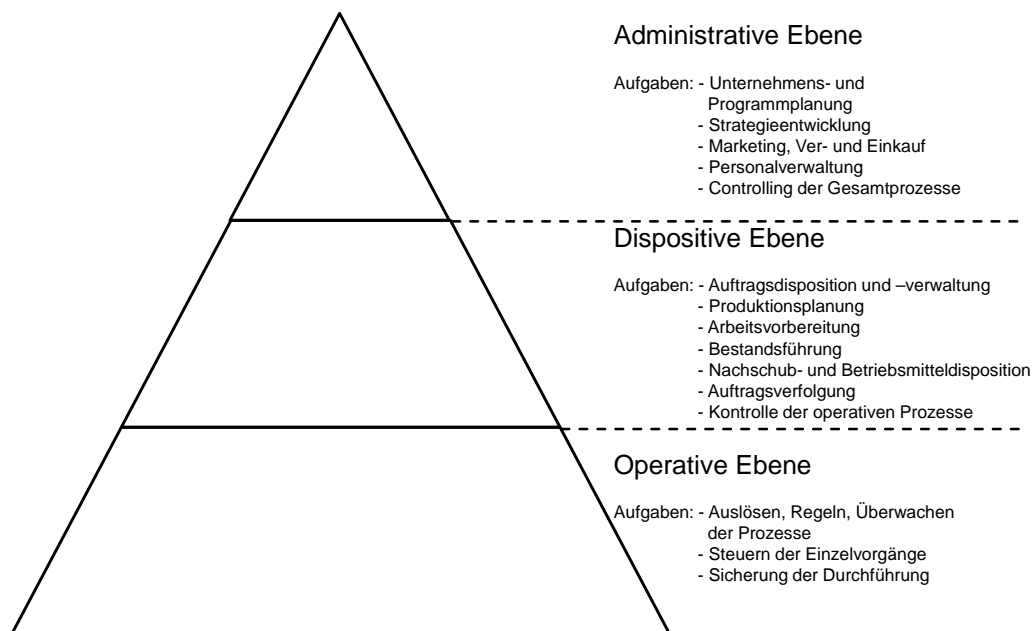


Abbildung 2.1: Organisationsebenen nach Gudehus [26]

Die Realisierung der Dispositionsentscheidungen obliegt der untergeordneten operativen Ebene. Je nach Größe und interner Organisation des Unternehmens kann die Disposition für alle Teilbereiche zentral oder dezentral erfolgen. In ersterem Falle ist die Auftragsdisposition in einer spezialisierten Organisationseinheit zusammengefasst. Diese übernimmt die Dekomposition der externen Aufträge in interne Teilaufträge und verteilt diese zur Bearbeitung an die nachgeordneten Leistungsbereiche. Im Falle einer dezentralen Organisation ist die Auftragsdisposition den einzelnen Organisationseinheiten, wie z.B. einzelnen Standorten im Unternehmensverbund oder Teilwerkstätten in größeren Fertigungsstrukturen, oftmals selbst überlassen [24]. Bei Mischformen orientiert sich die Aufgabenteilung zwischen der zentralen Dispositionsinstanz am Subsidiaritätsprinzip der Disposition. D.h. eine Zentraldisposition übernimmt nur die Aufgaben, die nicht dezentral ausgeführt werden können [27].

2.1.2 Dispositionsarten

Bei der Dispositionsart kann nach Lager- oder Auftragsorientierung sowie nach statischer und dynamischer Disposition unterschieden werden. Erstere Unterscheidung wird abhängig von der strategischen Ausrichtung vorgenommen und fokussiert auf die Frage, ob ein eingehender Auftrag durch im Lager vorrätige Artikel bzw. Ressourcen befriedigt werden kann. Ist dies möglich, kann direkt aus dem Lager geliefert oder auftragspezifisch gefertigt werden (Build-to-Order (BTO)). Andernfalls ist die Vergabe eines externen Fertigungsauftrages oder die Beschaffung der benötigten Ressourcen notwendig [26].

Die Kategorisierung nach statisch oder dynamisch erfolgt im Hinblick auf Umfang und Häufigkeit der Dispositionsvorgänge und Veränderlichkeit der Strategieparameter [22, 28]. Statische Dispositionsvorgänge werden in der Regel in längeren, fest definierten Zeitabständen oder zu bestimmten Zeitpunkten ausgeführt [29]. Der Planungshorizont kann hier, je nach Geschäftsbereich des Unternehmens, zwischen 30 Tagen und wenigen Stunden liegen [24]. Die statische Verfahrensweise erfasst jeweils die seit dem letzten Dispositionslauf neu eingegangenen Aufträge und disponiert diese unter Berücksichtigung noch nicht begonnener Aufträge und eventueller Veränderungen hinsichtlich der Ressourcenverfügbarkeit. Die Dispositionsstrategie (Lager- oder Auftragsfertigung) und die Strategieparameter (Nachschubmengen, Sicherheitsbestände, etc.) bleiben

dabei in der Regel über längere Zeit unverändert [26].

Die dynamische, veränderungsreaktive Disposition kann, wie die statische Variante, in festen Intervallen (periodendynamisch) oder nach Eintreten neuer Ereignisse (ereignisdynamisch) ausgelöst werden. Die periodendynamische Disposition erfolgt in kurzen Zeitabständen und berücksichtigt die relevanten Ereignisse der jeweils letzten Periode. Die ereignisdynamische Disposition wird explizit durch das Eintreten solcher Ereignisse angestoßen. Mögliche Auslöser einer Neudisposition können der Eingang neuer oder die Änderung bestehender Aufträge, bzw. der Ausfall einer oder mehrerer Ressourcen sein. Durch diese Verfahrensweise bietet die ereignisdynamische Disposition den maximalen Grad an Flexibilität, bedingt jedoch in Abhängigkeit von der Häufigkeit einer Neudisposition einen groß Planungs- und Zeitaufwand [30].

2.2 Touren- und Routenplanung

Die Touren-, bzw. Routen- oder Transportplanung ist ein zentraler Bestandteil von Ablauf- und Planungsprozessen. Die Kernaufgabe besteht darin, Transport- oder Dienstleistungsaufträge so zu Touren zusammenzufassen, dass sie mit den zur Verfügung stehenden Transportmitteln und -kapazitäten zu bewältigen sind. Hierbei ist eine möglichst optimale Auftragsreihenfolge festzulegen, die die Einhaltung ökonomischer Zielvorgaben, wie beispielsweise einer minimalen Wegstrecke oder Fahrzeit ermöglicht [31]. Es handelt sich also im Grundsatz um ein Entscheidungsproblem hinsichtlich des Transportweges und der Ladungszusammensetzung [32, 33].

2.2.1 Das Traveling Salesman Problem

Die einfachste Abbildung der zugrundeliegenden Wegfindungsproblematik wird häufig als Traveling Salesman Problem (TSP) bezeichnet [34]. Dieses beinhaltet die Reiseplanung für einen Handlungsreisenden, der verschiedene Orte besuchen und zu seinem Startpunkt zurückkehren soll, wobei die Gesamtlänge der Reise zu minimieren ist [35, 36]. Abbildung 2.2 zeigt eine einfache Variante des TSP mit sechs zu besuchenden Orten (a) und zwei mögliche Routen (b). Das TSP ist hinsichtlich seiner mathematischen Komplexität NP-schwer, d.h. nicht

in polynomialer Zeit lösbar [37]. Eine exakte Lösung im Sinne einer optimalen Reiseroute ist jedoch möglich, obwohl eine geringe Anzahl zu besuchender Wegpunkte bereits eine lange Rechenzeit des Lösungsalgorithmus zur Folge hat. Dies ist darin begründet, dass exakte Verfahren teilweise den gesamten Lösungsraum durchschreiten, um alle möglichen Lösungen zu enumerieren und im direkten Vergleich die Beste zu ermitteln [38, 39].

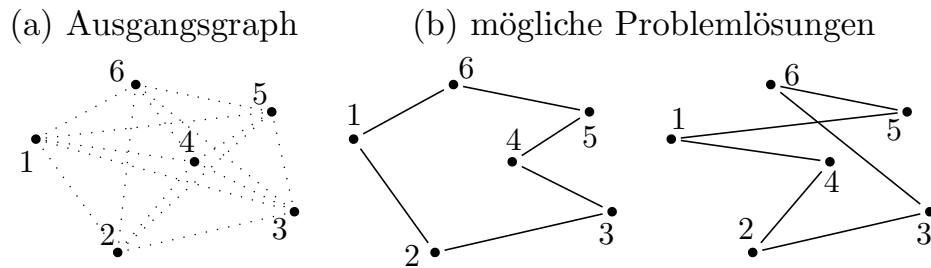


Abbildung 2.2: Ein einfaches Traveling Salesman Problem nach [36]

Beispiele für exakte Lösungsverfahren sind die sogenannten Branch-and-Bound Verfahren, bzw. deren Variante, die Branch-and-Cut Verfahren [40]. Beide Verfahrensweisen basieren auf einer rekursiven Zerlegung des ursprünglichen Problems in Teilprobleme (Branch). Diese Vorgehensweise führt zu einem Entscheidungsbaum von Teilproblemen, die jeweils Vereinfachungen des Ursprungsproblems darstellen. Beim Durchlaufen des Entscheidungsbaumes wird entweder in die Tiefe oder Breite verzweigt und nach jedem Schritt eine untere und, optional, auch eine obere Schranke (upper/lower Bound) ermittelt [41]. Anhand dieser können Teile des Baumes ausgeschlossen werden, in denen sich keine optimale Lösung befindet. Die Berechnung der Schranken wird in der Regel durch Heuristiken vorgenommen, deren Entscheidungsgüte die Laufzeit der Lösungssuche wesentlich beeinflusst. Im schlechtesten Falle werden tatsächlich alle möglichen Lösungen enumeriert, bevor die optimale Lösung identifiziert werden kann [39].

Entsprechend kommen in der Praxis Heuristiken zum Einsatz, die auf eine näherungsweise optimale Lösung hin ausgerichtet sind. Dieses Vorgehen verringert die Laufzeit, garantiert daher jedoch keine Optimalität [34]. Ein Beispiel hierfür wären die Nearest-Neighbour-Heuristik, die auf der Anfahrt des jeweils

nächstgelegenen, noch nicht besuchten Zielortes beruht [39].

Die Berücksichtigung weiterer Parameter, beispielsweise zusätzlicher Reisender (Transportmittel), Besuchszeitfenstern (Terminen) oder Beschränkungen der Transportkapazitäten, erhöht die Komplexität des Problems und erweitert es zu einem Multiple Traveling Salesman Problem (MTSP), einem Multiple Online Traveling Salesman Problem (MOTSP), bzw. zu einem Vehicle Routing Problem (VRP) (siehe Abschnitt 2.2.3), welches je nach berücksichtigten Restriktionen in verschiedenen Varianten vorliegt [42, 43]. Eine kurze Übersicht möglicher Varianten des Travelling Salesman Problems sind in Tabelle 2.1 zu sehen.

Tabelle 2.1: Auswahl von Varianten des TSP

Variante	Bedingungen
TSP	Ein Handlungsreisender, beliebige Anzahl Orte
Symmetrisches TSP	Hin- und Rückweg zwischen zwei Orten sind gleich lang
Asymmetrisches TSP	Hin- und Rückweg zwischen zwei Orten sind unterschiedlich lang
Multiple TSP	Mehrere Handlungsreisende, beliebige Anzahl Orte
Multiple Online TSP (VRP)	Mehrere Handlungsreisende, Zeitfenster, Beschränkung der Kapazitäten, beliebige Anzahl Orte

2.2.2 Das Pickup and Delivery Problem

Das Pickup and Delivery Problem (PDP) betrachtet die Planung von Touren, in deren Verlauf Ladung sowohl aufgenommen (pick up), als auch ausgeliefert (delivery) wird, wobei beide Ladeorte auftragsspezifisch variieren [37, 44]. In der einfachsten Variante sind Anzahl und Kapazität der zur Verfügung stehenden Fahrzeuge zu berücksichtigen, Erweiterungen des Problems betrachten

zusätzlich die Einhaltung von Zeitfenstern als Restriktion [45]. Weiterhin können PDP in dynamische und statische Varianten unterteilt werden. Erstere gehen von der Umsetzung einer Planung aus, die sich nach dem Antritt der Route nicht mehr verändert, letztere berücksichtigen auch den Fall nach Fahrteintritt eintreffender Aufträge [37]. Abbildung 2.3 zeigt ein Beispiel für ein dynamisches PDP-Problem, bei dem Nachfolgaufträge zu einer dynamischen Anpassung der Fahrtroute führen.

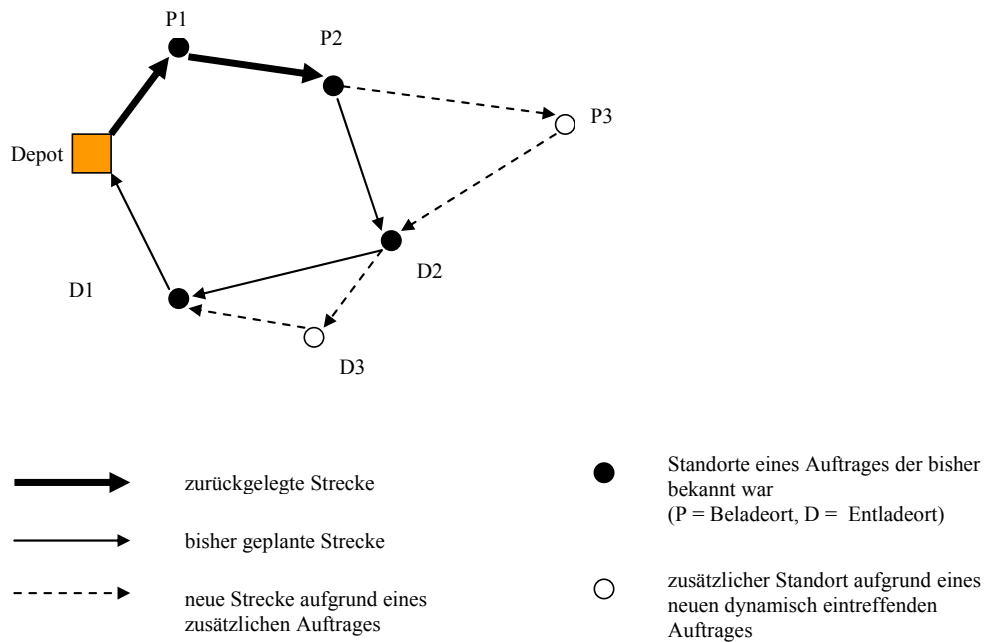


Abbildung 2.3: Ein dynamisches PDP-Problem [37]

Wie das TSP ist auch das Pickup and Delivery Problem NP-schwer und wird im Hinblick auf den Aufwand exakter Lösungsverfahren in der Regel mit Hilfe von Näherungsverfahren betrachtet [44].

Beispiele sind die Tabu-Suche, Simulated-Annealing oder Kombinationen beider Verfahren [46, 47]. Bei der Tabu-Suche handelt es sich um eine iterative Nachbarschaftssuche im Lösungsraum, bei der zwischen jeder Iteration bestimmte Lösungen für die weitere Betrachtung ausgeschlossen werden [48]. Dies erfolgt jeweils für einen bestimmten Zeitraum (Tabu-Dauer). Die Iterationen werden fortgeführt, bis eine gefundene Lösung einem gegebenen Qualitätskri-

terium entspricht. Das Simulated-Annealing bildet den physikalischen Abkühlungsprozess eines Metalls nach dem Erhitzen ab [49, 50]. Dieser findet sein Ende, wenn die Atome einen energiearmen und robusten Zustand nahe des Optimums gefunden haben [51].

2.2.3 Das Vehicle Routing Problem

Das Vehicle Routing Problem bildet das Problem des Handlungsreisenden auf Touren zwischen einem zentralen Depot und verschiedenen Orten bzw. Kunden ab [52]. Hierbei sind die Kundenaufträge in der Regel vorher bekannt und werden mit einer Fahrzeugflotte fester Größe und Kapazität bedient [53]. Wie das TSP liegt das VRP in verschiedenen Varianten vor (siehe Tabelle 2.2).

Tabelle 2.2: Auswahl von Varianten des VRP

Variante	Bedingungen
VRP	Zentrallager, verschiedene Kunden, bekannte Aufträge
Capacitated VRP	Kapazitätsrestriktionen, keine Aufteilung von Touren
Distance-Constrained VRP	Routenlänge beschränkt
VRP mit Time Windows	Zeitfenster für die Aufträge
VRP with Backhauls	Abliefern und Abholen von Gütern, jeweils getrennte Kunden
VRP with Pickup and Deliveries	Abliefern und Abholen von Gütern bei demselben Kunden
VRPPDP with Time Windows	Abliefern und Abholen von Gütern bei demselben Kunden mit Zeitrestriktionen

Werden z.B. Lieferungen betrachtet, die nicht auf mehrere Transporte aufgeteilt werden können, und sind die vorhandenen Transportfahrzeuge homogen, so handelt es sich um ein Capacitated Vehicle Routing Problem (CVRP). In

diesem Fall ist die Kapazität von zentralem Interesse. Ist die Länge der Routen beschränkt, handelt es sich um ein Distance Constrained Vehicle Routing Problem (DCVRP), bei der Berücksichtigung von Zeitfenstern liegt ein Vehicle Routing Problem with Time Windows (VRPTW) vor [54]. Das Vehicle Routing Problem with Backhauls (VRPB) betrachtet Touren, auf denen unter Berücksichtigung von Kapazitäts- und Terminrestriktionen sowohl Güter ausgeliefert, als auch aufgenommen und zum Lager zurückgeführt werden [55]. In diesem Fall sind die Routen so zu planen, dass die auszuliefernden Güter zuerst berücksichtigt werden, um die notwendigen Kapazitäten für die Ladungsaufnahme zu schaffen. Ähnlich dem grundlegenden VRP kann auch das VRPB um Zeitfenster zu einem Vehicle Routing Problem with Backhauls and Time Windows (VRPBTW) erweitert werden. Das Vehicle Routing Problem with Pickup and Delivery (VRPPDP), bzw. VRP with Pickup, Deliveries and Time Windows (VRPPDPTW), betrachten schließlich die gleichzeitige Auslieferung und Abholung von Gütern [54].

Das in der vorliegenden Arbeit adressierte Anwendungsszenario fällt in die Klasse der Dynamic Multi Vehicle PDP with Time Windows (DMVPDPTW). Hier werden, ausgehend von einem Zentrallager, mehrere Transportmittel und Zielorte berücksichtigt, wobei die Planung terminabhängig ist und mehreren Umweltrestriktionen unterliegen kann [56].

2.3 Selbststeuerung

Die zunehmende Komplexität und Dynamik von Produktions- und Logistikprozessen zeigt die Grenzen etablierter Planungs- und Steuerungsverfahren auf. Um den steigenden Anforderungen Rechnung zu tragen, sind in Wissenschaft und Forschung neue, innovative Ansätze in den Blickpunkt des Interesses gerückt. Einen solchen Ansatz stellt die Selbststeuerung dar [57]. Hierbei handelt es sich um ein Konzept, welches den Transfer von Entscheidungskompetenz weg von zentralen Instanzen, hin zu den betroffenen Objekten vorsieht [2]. Diese Objekte agieren autonom innerhalb von heterarchischen Strukturen, wobei die dezentrale Entscheidungsfindung zu einer verteilten Bewältigung von Dynamik und Komplexität führt. Zielsetzung ist eine Erhöhung der Robustheit und Zielerfüllung des Gesamtsystems.

Die zur Entscheidungsfindung notwendigen Informationen werden den handelnden Objekten durch den kombinierten Einsatz moderner Informations- und Kommunikationstechnologien zur Verfügung gestellt. Zu Identifikationszwecken wird hier beispielsweise auf RFID-Technologie gesetzt (Radio Frequency Identification), die Positionserfassung erfolgt oftmals mittels GPS-Systemen (Global Positioning System) [58].

System layer	Criteria	Properties			
Decision system	Time behaviour of objective system	static	mostly static	mostly dynamic	dynamic
	Location of objective system	global	mostly global	mostly local	local
	Organisational structure	hierarchical	mostly hierarchical	mostly heterarchical	heterarchical
	Quantity of alternative decisions	none	some	many	infinite
	Type of decision making	static	rule-based		learning
	Location of decision making	system layer	subsystem layer		system-elements layer
	System behaviour	elements and system deterministic	elements non-/system deterministic	system non-/elements deterministic	elements and system non-deterministic
Information system	Data storage	central	mostly central	mostly decentral	decentral
	Data processing	central	mostly central	mostly decentral	decentral
	Interaction ability	none	data allocation	communication	coordination
Execution system	Flexibility	inflexible	less flexible	flexible	highly flexible
	Identification ability	no elements identifiable	some elements identifiable	many elements identifiable	all elements identifiable
	Measuring ability	none	others	self	self and others

Abbildung 2.4: Grad der Autonomie in selbststeuernden Systemen [4]

Der Grad der Selbststeuerung kann, abhängig von verschiedenen Faktoren, variieren [4]. Kriterien für den Grad der Selbststeuerung sind auf Abbildung 2.4 zu sehen. Lassen beispielsweise die physischen Eigenschaften der betroffenen Objekte keine Ausstattung mit der notwendigen Technologie zur vollständig autonomen Entscheidungsfindung zu, so kann eine Repräsentation jedes einzelnen Objektes durch Softwareagenten stattfinden [6]. Das resultierende Multi-

Agentensystem (MAS) ermöglicht dann die Entscheidungsfindung einzelner Objekte gemäß individueller Zielfunktionen und die Interaktion der Objekte untereinander. Neben der technischen Umsetzung hat auch die adressierte Systemebene einen Einfluß auf den vorliegenden Grad der Selbststeuerung [59]. Bisherige Anwendungen der Selbststeuerung erstrecken sich vom Routing autonomer Fahrzeuge auf Containerterminals [60] über die Reihenfolge- oder Handhabungsplanung in Produktionsnetzwerken [61] [62] bis hin zur Stauplanung auf Automobilterminals [63]. Im Hinblick auf die Problemstellungen Distribution und Routenfindung existieren selbststeuernde Ansätze z.B. im Bereich des Sammelgutverkehrs [64, 65] oder intermodalen Transports [66]. Hier kommen vorrangig agentenbasierte Lösungen zum Einsatz, um Probleme der Reihenfolgeplanung oder Wegfindung in komplexen Systemen zu betrachten. Im Gegensatz zu dem in dieser Arbeit präsentierten Distributionssystem werden die Fragestellungen jedoch in der Regel individuell oder im Rahmen eines statischen Logistiksystems betrachtet.

2.4 Autonomous Logistics Engineering Methodology (ALEM)

Die Modellierung selbststeuernder Systeme erfordert die Anwendung speziell auf die Eigenschaften der Selbststeuerung ausgerichteter Verfahren und Werkzeuge [14, 67]. Diese müssen in der Lage sein, die Fähigkeiten, die Ziele, das implizite Wissen und die Kommunikation selbststeuernder Objekte abzubilden. Da die Planungsentscheidungen in selbststeuernden Systemen durch wechselseitige Verhandlungen zustande kommen, liegt ein besonderer Fokus auf der Kommunikation der Objekte untereinander. Entsprechende Modellierungsansätze betrachten entsprechend die verschiedenen Ebenen der Entscheidungsfindung zuerst im Einzelnen, bevor sie zu einer Definition der Objekte zusammengefügt werden [14]. Die Ausformung der Modellierungsansätze variiert hierbei, denkbar sind Anwendungen in Form physischer Demonstratoren [68] oder Methodologien, die in ihrer Ausgestaltung der Objekte von vorneherein auf die Simulation in Multiagentensystemen oder andere Formen der digitalen Repräsentation ausgelegt sind. Wie bereits im Abschnitt 2.3 erläutert, kann ein selbststeuerndes Objekt, in Abhängigkeit vom gewählten Abstraktionsgrad,

auf unterschiedlichen Ebenen eines Systems angesiedelt sein. In einer sehr granularen Betrachtung umfasst die Repräsentation nur ein einzelnes Gut oder Werkstück, in großen Produktionsnetzwerken können ganze Produktionsstätten betrachtet werden [69].

Das ALEM Modellierungskonzept beinhaltet daher ein Sichtenkonzept, dass die entsprechenden Teilaspekte selbststeuernder Objekte berücksichtigt [8, 14]. Die einzelnen Komponenten von ALEM stellen sich wie folgt dar:

- **ALEM-N**

Die ALEM-Notation beinhaltet die explizite Notation für jeden Typ von Elementen sowie die zugehörige Bedeutung. Weiterhin definiert ALEM-N das Sichtenkonzept für die Elemente selbststeuernder Systeme.

- **ALEM-P**

ALEM-Procedure definiert die prozedurale Abfolge der Modellierung und beinhaltet die Referenz für die Analyse und Spezifikation des betrachteten logistischen Systems.

- **ALEM-T**

Das ALEM-Tool verbindet beide Komponenten in einem Softwarewerkzeug. Dieses ermöglicht die Erstellung von modular wiederverwendbaren Referenzkomponenten.

Die Funktionsweise der einzelnen Komponenten von ALEM wird in den folgenden Abschnitten erläutert.

2.4.1 ALEM-Notation

Das Sichtenkonzept der ALEM-Notation dient dazu, die der Modellbildung inhärente Komplexität zu reduzieren und ermöglicht eine strukturierte Modellbildung, aufgeschlüsselt in statische Modellkomponenten für die Struktur und dynamische für das Verhalten der Systemelemente [8]. Ausgangspunkt der Modellierung in ALEM ist die Beschreibung der relevanten logistischen Objekte durch Klassendiagramme in der Unified Modeling Language (UML) [70, 71] (siehe Abbildung 2.5).

Dieser Teil der Modellierung definiert die Strukturen des betrachteten Systems und wird daher als Struktursicht bezeichnet. Das individuelle Wissen der selbststeuernden Objekte wird in der Wissenssicht modelliert. Ebenfalls in Form von UML-Diagrammen ist hier das inhärente Wissen jedes Objektes,

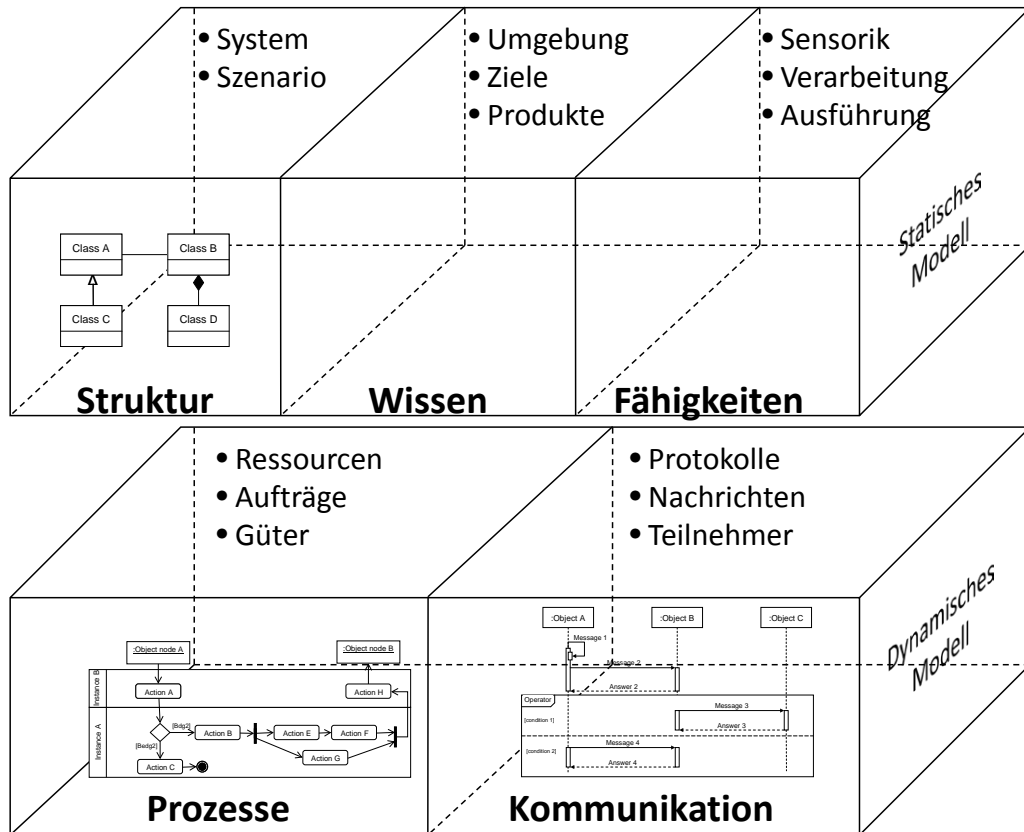


Abbildung 2.5: ALEM-Sichten nach [71]

bzw. Objekttyps beschrieben, welches für eine autonome Entscheidungsfindung im Rahmen des Gesamtsystems notwendig ist. Die Wissensbasis eines autonomen Objektes hat direkte Auswirkungen auf die Fähigkeiten, die es im Rahmen logistischer Prozesse anwenden kann. Die Fähigkeiten stellen hier Abstraktionen von Lösungen dar, die ein Objekt für logistische Fragestellungen zu offerieren hat [8].

Die Zusammenwirkung von Fähigkeiten aus der entsprechenden Sicht sowie des inhärenten Wissens, wird in der Prozesssicht weiter ausgeführt. Diese Sicht definiert die im Modell zulässigen logischen und zeitlichen Zusammenhänge zwischen Aktivitäten der autonomen Objekte und führt aus, welche Auswirkungen die Aktionen und Interaktionen auf die Zustände der Objekte haben. Die Notation des prozessualen Verhaltens erfolgt in Aktivitäts- und Zustandsdiagrammen, ähnlich der Modellierung von Geschäftsprozessen mittels der UML [70, 71]. Den Abschluss des Sichtenkonzeptes bildet die Kommunikationssicht,

in welcher die Interaktion der autonomen Objekte modelliert wird. Sie definiert einen wesentlichen Teil des Entscheidungsfindungsprozesses und konzentriert sich auf das Festlegen der Inhalte und der zeitlichen Abfolge des Nachrichtenaustausches innerhalb des Systems. Hier kommen UML-Sequenzdiagramme zum Einsatz, um die jeweiligen Teilnehmer der Kommunikation, die übertragenen Inhalte sowie den zeitlichen Fortschritt der Kommunikationsprozesse zu spezifizieren.

Bei der Betrachtung der jeweiligen Sichten ist zwischen der Makro- und der Mikroperspektive zu unterscheiden (vgl. Abbildung 2.5). Erstere stellt eine externe Sicht auf die Objekte des Systems dar, die die Interaktion und die Interdependenzen zwischen ihnen aufzeigt. Hier sind alle Teilsichten des ALEM-Ansatzes von Interesse, während für die Mikrosicht besonders die Prozess- und Wissensmodellierung sowie die Definition der Fähigkeiten aus systeminterner Sicht im Mittelpunkt stehen [8]. Eine ergänzende Übersicht der verschiedenen Sichten und Perspektiven und ihrer Beziehungen untereinander ist auf der Abbildung A.1 auf Seite 158 im Anhang zu sehen.

2.4.2 ALEM-Procedure

ALEM-Procedure stellt eine Richtlinie für die Modellierung eines selbststeuernden Systems dar. Die definierten Schritte sind darauf ausgerichtet, einen Experten mit tieferen logistischen Kenntnissen soweit anzuleiten, dass eine semi-formale Spezifikation des Zielsystems entsteht [8]. Der Modellierungsprozess basiert auf den in ALEM-N definierten Elementen und besteht aus acht Abschnitten, die teils iterativ durchlaufen werden (siehe Abbildung 2.6).

Schritt eins betrifft die Ziele, die innerhalb des zu modellierenden Systems erreicht werden sollen. Die Entwicklung der Zieldefinition erfolgt deduktiv, d.h. vorerst wird nur die globale Zielstellung des Systems definiert, bevor in den Folgeschritten des Prozesses eine Ableitung der Teilziele der einzelnen Systemelemente vorgenommen wird. Die Dokumentation der globalen Ziele findet in Form von UML-Klassendiagrammen Eingang in die Wissenssicht des ALEM-Modells. Schritt zwei des Vorgehens betrifft die Strukturdefinition des Systems, hier wird festgelegt, welche Elemente existieren und in welcher Beziehung sie zueinander stehen. Darauf aufbauend findet die Partitionierung des Systems in selbststeuernde und nicht selbststeuernde Komponenten statt. Die Dokumen-

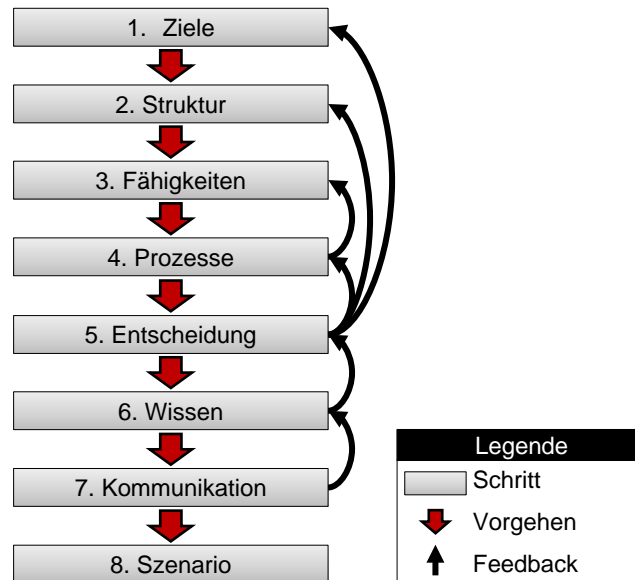


Abbildung 2.6: ALEM-Procedure nach [9, 14]

tation dieses Schrittes wird wie der vorangegangene in Klassendiagrammen vorgenommen und der Struktursicht zugeordnet.

Der Folgeschritt konzentriert sich auf die Ausgestaltung der Fähigkeiten der Systemelemente. Fähigkeiten sind hier als abstrakte Definition von Operationen zu verstehen, zu denen die jeweiligen logistischen Objekte in der Lage sind [8]. Fähigkeiten können strukturell weiter in Sub-Fähigkeiten unterteilt werden und sind in Klassendiagrammen definiert, welche Eingang in die Fähigkeitensicht finden. Die Prozesse, die durch den kombinierten Einsatz der Objektfähigkeiten innerhalb des modellierten Systems stattfinden, werden in Schritt vier definiert. Hier wird zunächst ein idealer, störungsfreier Prozessverlauf angenommen, bevor darauf folgend die Prozesse für den Umgang mit Störungen konzipiert werden. Die Definition wird auf diesem Level noch mit abstrakten Umschreibungen für die Entscheidungen der handelnden Objekte durchgeführt, eine Ausdifferenzierung erfolgt im späteren Verlauf der Modellierung. Ergebnis der Prozessdefinitionen sind Abbildungen der Systemprozesse, die später einen automatisierten Ablauf inklusive einer Fehlerbehandlung ermöglichen [8]. Die Definitionen beinhalten Aktivitätsdiagramme sowie Zustandsautomaten (engl.: State Machines) [72].

Die Entscheidungsfindung der autonomen Objekte wird durch die Aktivitäts-

diagramme in der Prozesssicht und durch Klassendiagramme und Wissenslandkarten (engl.: Knowledge Maps) in der Wissenssicht strukturiert. Hierbei wird auf die Grobstruktur aus der Prozessdefinition zurückgegriffen, die Vorgehensweise bei der Entwicklung der Entscheidungsmodelle wird an Vorbilder aus der Entscheidungstheorie angelehnt [73]. Die Struktur einer Entscheidung wird hier durch verschiedene Elemente charakterisiert, z.B. durch das entscheidende Objekt, dessen Ziel, die zugehörige Zielfunktion, den Lösungsraum möglicher Entscheidungen sowie den Auslöser (engl.: Trigger), der den Entscheidungsprozess anstößt. Schritt sechs der Modellierung betrachtet das für die Entscheidungsfindung notwendige Wissen. Hier wird spezifiziert, welches Wissen im Detail für jede Entscheidung notwendig ist, welche Informationen jedem Objekt speziell oder generell systemweit zur Verfügung stehen müssen und an welcher Stelle sie jeweils in aktueller Form akquiriert werden können. In Schritt sieben werden unter Rückgriff auf die bereits vorhandenen Definitionen von Prozessen und Informationsquellen die Kommunikationsstrukturen des Modells spezifiziert. Eine Rolle spielen hier die logischen und zeitlichen Zusammenhänge zwischen den Prozessen, den zugehörigen Prozessentscheidungen und den dafür akquirierten oder ausgetauschten Informationen. Ergebnis dieses Schrittes sind detaillierte Kommunikationsabläufe in Form von Sequenz- und Klassendiagrammen [8, 74].

Den Abschluss des Modellierungsprozesses bildet die Betrachtung des zugrundeliegenden Szenarios. Dieses wird beispielsweise durch die Dokumentation aller Systemkomponenten in einem Layoutdiagramm spezifiziert. Die Ausgestaltung des Szenarios ist hierbei vorrangig vom Anwendungsfeld abhängig, stellt jedoch in jedem Falle die Summe aller während der Modellierung vorgenommenen Definitionen dar. Zusätzlich können szenariospezifische Detailinformationen, wie beispielsweise Auftragsdaten, für das modellierte System integriert werden.

2.4.3 ALEM-Tool

ALEM-Tool führt schließlich den Modellierungsprozess in einem Softwarewerkzeug zusammen [75]. Das Werkzeug besteht aus einer Reihe von Plugins der Eclipse Rich Client Platform (RCP). Diese ermöglicht es, auf Basis des Frame-

works der Eclipse Entwicklungsumgebung unabhängige Anwendungen zu implementieren [76]. Für die Unterstützung der Modellierung mittels ALEM beinhaltet ALEM-Tool verschiedene grafische Editoren, die den Umgang mit den in den jeweiligen Sichten erforderlichen Diagrammtypen ermöglichen. Hierbei kommen im wesentlichen Open Source Frameworks, wie das Eclipse Modelling Framework (EMF) oder das Eclipse Graphical Modelling Framework (GMF) zum Einsatz [77]. Abbildung 2.7 zeigt den strukturellen Aufbau des Modellierungswerkzeuges.

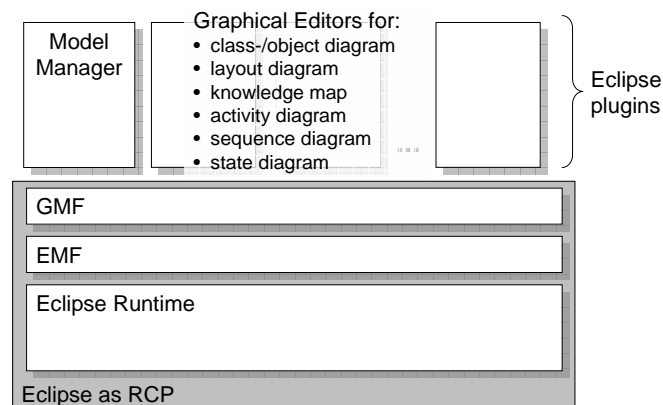


Abbildung 2.7: Aufbau von ALEM-T [78]

ALEM-T ist plattformunabhängig und daher unter allen gängigen Betriebssystemen, z.B. Microsoft Windows, Linux, MacOS X, Sun Solaris, HP UX oder IBM AIX, verwendbar [78]. In der vorliegenden Arbeit findet ALEM-T zu konzeptionellen Zwecken Verwendung, die Umsetzung in ein simulationsfähiges Modell erfolgt direkt in, bzw. für die Simulationsumgebung PlaSMA (vgl. Kapitel 2.5 und 4.3).

2.5 Platform for Simulation with Multiple Agents (PlaSMA)

PlaSMA stellt ein auf der Programmiersprache Java basierendes Werkzeug zur Multiagentsimulation dar, das speziell für die Anforderungen selbststeuernder Produktions- und Logistiksysteme konzipiert ist [21, 79]. PlaSMA basiert hierbei auf dem Java Agent Development Framework (JADE), einer Plattform für die Entwicklung von Multiagentensystemen (Multi Agent System (MAS)), die den Kriterien der Foundation for Intelligent Physical Agents (FIPA) entspricht [80, 81, 82].

Zu den Grundkomponenten von PlaSMA gehören die Simulationssteuerung, das Weltmodell, die Agenten, eine Analysefunktion sowie eine grafische Oberfläche. Die Steuerungskomponente ist hierbei für die Initialisierung des Weltmodells, die Verwaltung der Lebenszyklen der Agenten und die Zeitsteuerung innerhalb der Simulation zuständig [21]. Der Simulationsablauf ist szenario-basiert, d.h. die zugrundeliegende Struktur des simulierten logistischen Systems und die Eigenschaften der enthaltenen Objekte wird in einem spezifischen Szenario definiert. Dieses enthält eine Beschreibung der zur Verfügung stehenden Infrastruktur, z.B. das Straßennetz für ein Logistiksystem, sowie die Spezifikation der beteiligten Agenten.

2.5.1 PlaSMA - Ontologien

Die Definition eines PlaSMA-Szenarios orientiert sich an Ontologien für die wesentlichen Bestandteile wie Transportmittel, Kommunikation oder Güter [21]. Diese sind modular aufgebaut und orientieren sich an der Beschreibungslogik der Web Ontology Language (OWL), so dass die Entwicklung eines Szenarios mit Standardwerkzeugen erfolgen kann [83]. Eine Übersicht der für die Szenarioentwicklung relevanten Ontologien in PlaSMA ist auf Abbildung 2.8 zu sehen.

Die Top-Level Ontologie beinhaltet alle Beschreibungen, die die generelle Beschaffenheit der Infrastruktur oder physischer Objekte betreffend. Alle anderen Ontologien basieren auf der Top-Level Ontologie oder erweitern diese. Die Ontologie für Güter (engl. Goods) beinhaltet Schemata für die Beschreibung

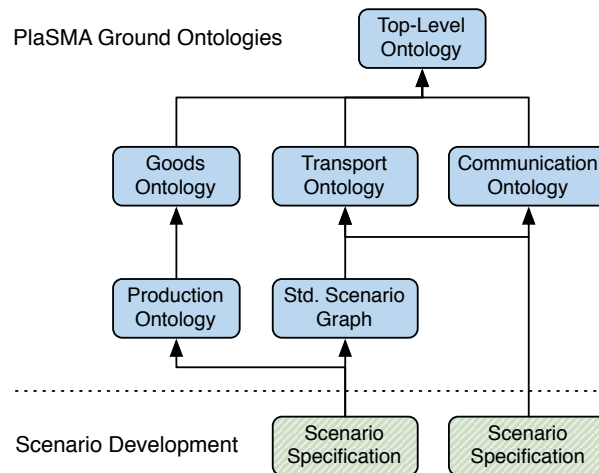


Abbildung 2.8: Ontologien in PlaSMA [21]

von Gütern. Diese können z.B. physisch oder nicht-physisch (Rechte, Patente, etc.) sein. Weiterhin sind hier Eigenschaften definierbar, die sich direkt auf den Transport auswirken. Hierzu zählt die Frage, ob es sich um Stück- oder Schüttgut handelt, der Transport in Gebinden oder Ladungsträgern erfolgt, bzw. die Güter verderblich oder als Gefahrgut zu betrachten sind. Die Transportontologie ergänzt schematische Beschreibungen für Objekte oder Teile der Infrastruktur, die mit Transportaufgaben zu tun haben. Hierzu gehören Orte mit logistischen Funktionen und Transportrelationen innerhalb des Transportnetzwerkes sowie Ausrüstung für Transport, Ladevorgänge oder Handhabung von Gütern [21]. Die Interaktion zwischen den Objekten wird in der Kommunikationsontologie festgelegt. Sie enthält die Objekte und Vorrichtungen für die Übermittlung von Daten sowie deren Eigenschaften. Hierzu gehören technische Spezifikationen wie Energieversorgung, Frequenzen oder Übertragungreichweiten. Die Produktionsontologie betrachtet die Intralogistik von Produktionssystemen und bietet hierzu Möglichkeiten zur Modellierung von Produktionsressourcen und Aufträgen.

Abbildung 2.9 zeigt die Beziehungen zwischen dem physischem, dem entsprechenden ontologischen Objekt und dem Agenten, der in der Simulation als Repräsentant des Objektes agiert. ObjectAgent 001 (linke Bildhälfte) repräsentiert beispielsweise das Transportfahrzeug Truck 001. Bezüglich seiner ontologischen Definition ist OA 001 eine Instanz der Klasse ObjectAgent, die

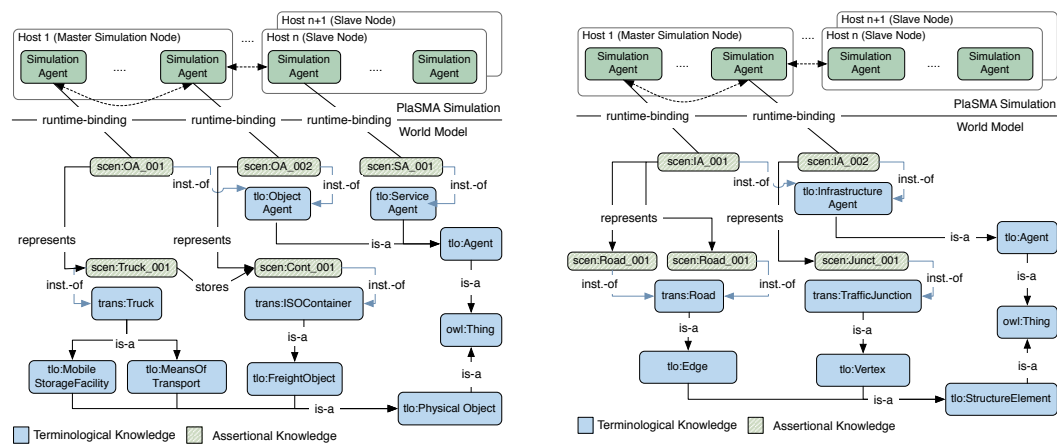


Abbildung 2.9: Modellierung in PlaSMA am Beispiel von Agenten [21]

wiederum eine Verfeinerung der allgemeinen Klasse Agent definiert. Diese repräsentiert generell Gegenstände (engl. Things), die als physisches Objekt definiert sind. Analog hierzu werden Elemente der Infrastruktur modelliert. In der rechten Bildhälfte repräsentiert der InfrastructureAgent 001 die Straße 001. Er stellt hierbei eine Instanz der Klasse InfrastructureAgent dar, die wie die Objektagenten eine Spezifikation der allgemeinen Agentenklasse darstellen und sich ontologisch über Gegenstände (Things) zu ihrer Grundklasse InfrastructureElement zurückverfolgen lassen[21].

2.5.2 Anwendungsgebiete

Die bisherigen Einsatzgebiete von PlaSMA erstrecken sich von der Vorhersage von Verkehrsbedingungen über die Kooperation im Containerverkehr bis zu Planungsaufgaben im Sammelgutverkehr oder der Intralogistik [84, 85, 65, 61]. Hierbei konzentriert sich der Einsatz von PlaSMA jedoch auf die vergleichende Simulation und Evaluation von Selbststeuerungsstrategien für die jeweiligen Anwendungsfelder. Im Rahmen dieser Arbeit wird PlaSMA dahingehend modifiziert, dass die Simulationsergebnisse direkt in die reale Auftragsabwicklung in der Veranstaltungslogistik übertragbar sind (vgl. Kapitel 4.2 und 4.4). Zu diesem Zweck werden, unter anderem, die PlaSMA-Agenten in die Lage versetzt, Entscheidungen bezüglich der Planung von Routen zu treffen. Hierzu

wird die Vorgehensweise des DLRP für die Routen- und Tourenplanung als Fähigkeit für die betreffenden Agentenklassen integriert.

2.6 Distributed Logistics Routing Protocol (DLRP)

Das DLRP ist ein Konzept für das Routing in dynamischen Netzwerken selbststeuernder logistischer Objekte [19, 86, 87]. Es ist von Protokollen für den Verkehr von Datenpaketen in großen Daten- und Kommunikationsnetzwerken, wie beispielsweise dem Internet, abgeleitet und basiert auf den strukturellen Ähnlichkeiten beider Netzwerktypen. In beiden Anwendungsgebieten ist eine zentrale Planung des Routingverfahrens aufgrund von Größe, Komplexität und Dynamik des betrachteten Systems nicht möglich. Beim Datenaustausch über dezentrale Strukturen wird aus diesen Gründen von jeher auf selbststeuernde Methoden gesetzt, um Datenpakete über dynamisch veränderliche Serverstrukturen austauschen zu können. Das DLRP überträgt diese Vorgehensweise auf das Routing logistischer Objekte über Straßen-, Schienen-, und Luftverkehrsnetzwerke [19].

Das DLRP verfolgt hier die Grundidee, nicht nur die Wegfindung von Transportfahrzeugen, sondern vorrangig die Wegfindung der Transportgüter zu betrachten. Diese werden als selbststeuernde Objekte aufgefasst und sind somit in Anlehnung an den allgemeinen Selbststeuerungsgedanken für ihre Routen innerhalb des Netzwerkes selbst verantwortlich. Hierbei wird jedoch, im Gegensatz zu Kommunikationsnetzwerken, eine Unterscheidung nach Klassen vorgenommen. Dies liegt darin begründet, dass im Gegensatz zu Datenpaketen, die eine einheitliche Klasse formen, verschiedene Typen von logistischen Objekten existieren. Diese unterscheiden sich nach ihren Eigenschaften und somit in den Bedürfnissen im Hinblick auf die Routen, die sie verfolgen können [87]. Daher versteht sich das DLRP als Rahmenprotokoll für verschiedene Algorithmen, die jeweils eine eigene Klasse logistischer Objekte fokussiert.

2.6.1 Grundprinzipien

Das DLRP basiert auf fünf Grundprinzipien, um mit den Anforderungen komplexer und dynamischer Netzwerke umgehen zu können (siehe Abbildung 2.10) [87]. Das Erste betrifft die Aufteilung von Zielen auf einzelne Objekte (Zielaufteilung), d.h. die Gesamtaufgabenstellung wird zum Ziel der Komplexitätsreduktion in mehrere Teilaufgaben zerlegt.

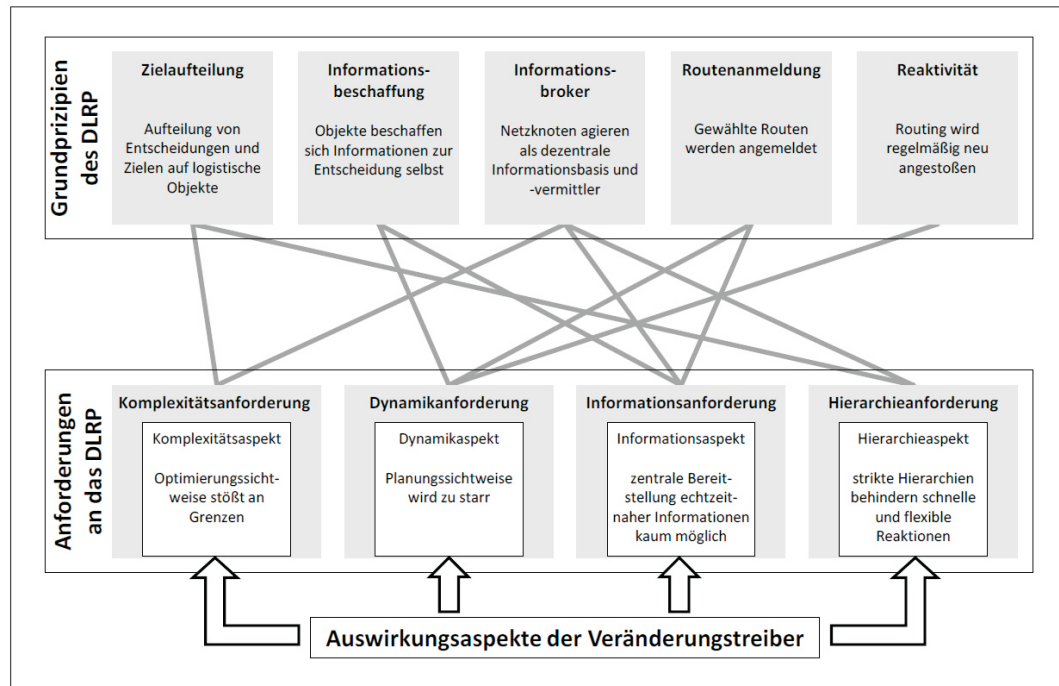


Abbildung 2.10: Die fünf Grundprinzipien des DLRP [87]

Im Hinblick auf die Routenfindung für alle Objekte im System heißt dies, dass die globale Suche nach der optimalen Route für die Summe aller Objekte in einzelne Suchen nach den Routen für Einzelobjekte zerfällt. Auf diese Art ist es möglich, dass Entscheidungen hin zu den einzelnen Objekten verlagert werden können, ohne dem Wunsch nach einem globalen Optimum widersprechen zu müssen. Zwar wird kein, im Bezug auf das System, übergreifendes Optimierungsproblem betrachtet, jedoch stehen die Einzelprobleme so in Abhängigkeit voneinander, dass die Ermittlung eines globalen Optimums weiterhin möglich ist. Die Betrachtung von Einzelproblemen führt weiterhin zu mehr Flexibili-

tät bei der Bewältigung von Dynamiken in der Netzwerkstruktur. Zu guter Letzt wird durch die Zielaufteilung die Hierarchie verflacht, so dass ein mit den Grundlagen der Selbststeuerung korrespondierendes heterarchisches System entsteht.

Das zweite Grundprinzip betrifft die Informationsbeschaffung der logistischen Objekte. Da das DLRP reaktiv mit Veränderungen des Systems umgeht, müssen die für Entscheidungen notwendigen Informationen von jedem Objekt aktiv selbst beschafft werden. Hierbei besitzt jedes Objekt zumindest die notwendigen lokalen Informationen und ergänzt diese, falls möglich, durch globale Informationen, die den Gesamtnetzzustand betreffen. Diese Methodik klassifiziert das DLRP als eine Information Discovery Method, da nicht ausschließlich mit lokalen Informationen gearbeitet wird [88].

Grundprinzip drei betrifft die zugehörige Informationshaltung im System. Da keine Zentralinstanz zur Verwaltung der Informationen existiert, werden diese dezentral an den Netzknoten vorgehalten, die somit als redundante Datenspeicher und Informationsvermittler zwischen den autonomen logistischen Objekten dienen [87]. Diese indirekte Kommunikation und die zugrundeliegende dezentrale Informationsstruktur unterstützen die flachen Hierarchien innerhalb des Netzes, da alle Objekte auf der gleichen Datenbasis planen. Weiterhin ermöglicht die Informationsstruktur eine beliebige Erweiterung des Netzes, da keine Kapazitäten einer Zentralinstanz hinsichtlich Speicherung und Verteilung von Informationen berücksichtigt werden müssen.

Grundprinzip vier konstituiert die Anmeldung von Routen, die logistische Objekte durch das System nehmen. Durch die Anmeldung werden den verschiedenen Objekten die notwendigen Informationen für ihre Planungen zur Verfügung gestellt. So wissen Transportgüter von den Routen der Transportfahrzeuge und umgekehrt. Das fünfte und letzte Grundprinzip des DLRP betrifft die Reaktivität, mit der logistische Objekte durch Um- und Neuplanen auf Änderungen innerhalb des Netzwerkes reagieren können. Die Neuplanungen betreffen in der Regel die Wahl der Route und werden an jedem Knotenpunkt oder in festen Zeitintervallen angestoßen, wobei eine Routenänderung nur vorgenommen wird, wenn dadurch eine signifikante Verbesserung erzielt wird [87].

2.6.2 Algorithmus des DLRP

Die Struktur des DLRP besteht aus zwei Typen von Objekten; den logistischen Objekten und den Datenobjekten (siehe Abbildung 2.11).

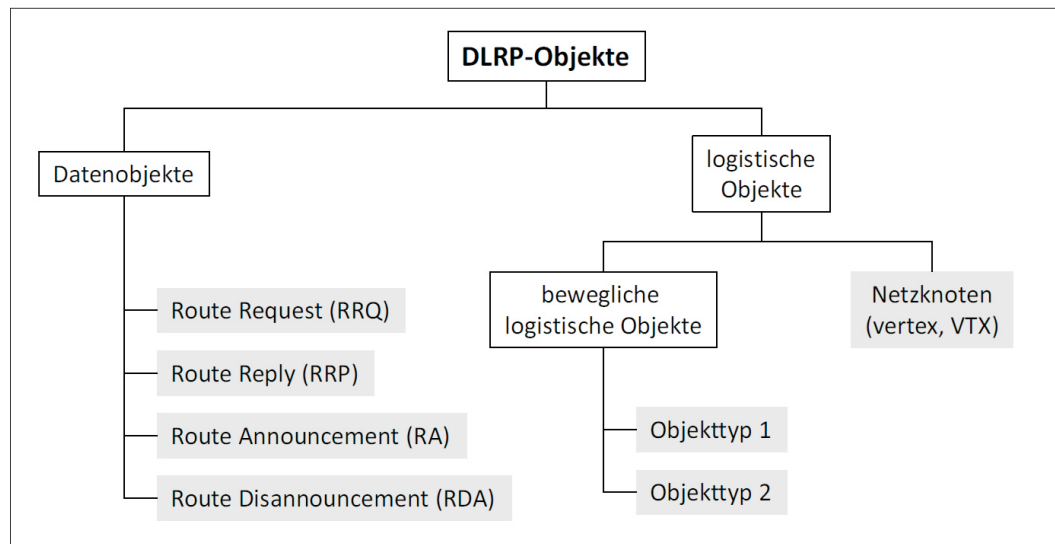


Abbildung 2.11: Die Objekttypen des DLRP [87]

Zu ersterer Kategorie gehören die beweglichen Objekte wie Transportfahrzeuge oder -güter. Zusätzlich werden die Netzknoten aufgrund ihrer Funktion bei der Informationsakquise und Mittler bei der Routenfindung als nichtbewegliche logistische Objekte betrachtet. Zu den Datenobjekten gehören die Nachrichten, die im Rahmen der Planungen erzeugt werden. Diese sind die Route Request (RRQ), Route Reply (RRP), Route Announcement (RRA) und Route Disannouncement (RDA). Die Routenplanung verläuft nun, schematisch vereinfacht dargestellt, wie auf Abbildung 2.12 skizziert.

Benötigen zwei bewegliche Objekte eine Route in gegenseitiger Abhängigkeit, beispielsweise bei Transportgut und -fahrzeug, so beginnt der Prozess mit einer Route Request des Transportgutes an den nächsten Knoten im Netzwerk. Dieser komplettiert die Anfrage mit den notwendigen Daten und sendet sie weiter. Erreicht die Anfrage den Zielknoten, wird eine Route Reply erstellt und zurückgesendet. Je nachdem, wie viele Alternativrouten existieren, erreichen das anfragende Objekte mehrere Antworten, zwischen denen es wählen kann. Die

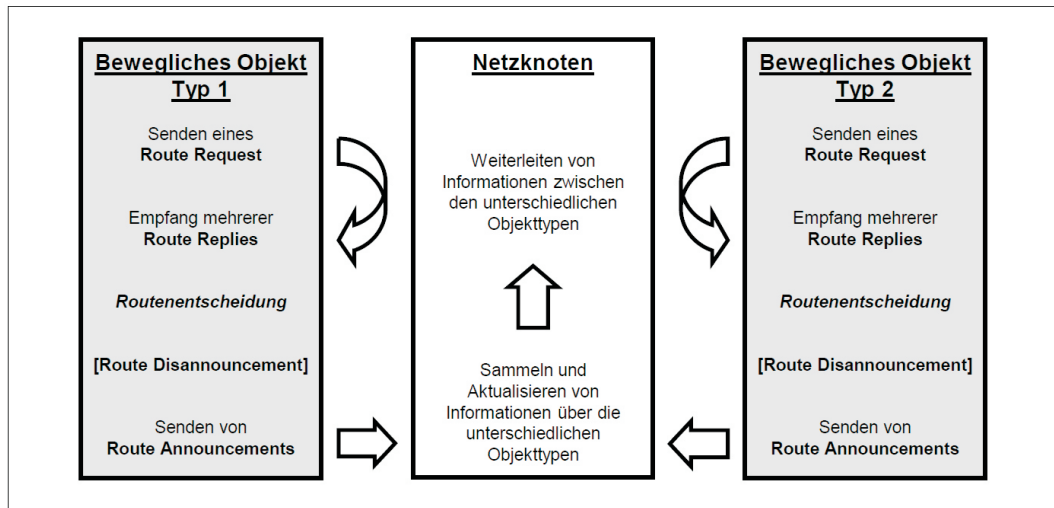


Abbildung 2.12: Schematische Vorgehensweise des DLRP [88]

beste Route wird nun ausgewählt und an jedem Knoten auf dem Weg zum Ziel angemeldet. War vorher eine andere Route angemeldet, wird diese per Disannouncement abgemeldet. Als Ergebnis liegen allen Netzknoten die Routeninformationen des Objektes vor. Das Transportfahrzeug verfährt ähnlich, so dass beide am Ende des Prozesses in der ganzen oder Teilen der Route zusammenfinden. Die Knoten dienen hierbei, wie in Abschnitt 2.6.1 beschrieben als Informationsmittler, die allen Objekten die relevanten Informationen zukommen lassen, so dass Transportmittel ihre Kapazitäten an Transportgüter vermitteln, bzw. umgekehrt Kapazitäten angefragt werden können.

2.6.3 Varianten des DLRP

DLRP Transportlogistik

Das DLRP existiert in zwei Varianten, die auf jeweils unterschiedliche Fragestellungen abzielen. Das Distributed Logistics Routing Protocol Transportlogistik (DLRP_t) betrachtet Netzwerke der Transportlogistik, das Distributed Logistics Routing Protocol Produktion (DLRP_p) ist auf die Begebenheiten der Fertigungslogistik in Produktionsnetzwerken spezialisiert.

Das DLRP_t basiert auf einem Pickup and Delivery Problem with Time Windows (PDPTW), erweitert dieses jedoch noch um einige Faktoren wie beispielsweise inhomogene Stückgüter und Transportfahrzeuge sowie einen dynamischen Auftragseingang [87]. Weiterhin sind die im Vorabschnitt erläuterten Objekttypen auf drei angewachsen. Bei den beweglichen logistischen Objekten wird nun explizit zwischen Fahrzeugen und Gütern unterschieden, die verschiedenen Bedingungen und Eigenschaften unterliegen. Die Grundlagen eines DLRP_t-Szenarios definieren sich daher wie folgt:

- Die Topologie des Netzwerkes besteht aus Knoten, zwischen denen Kanten als Verbindungen existieren. Es müssen jedoch nicht alle Knoten untereinander verbunden sein.
- Verbindungen erlauben unterschiedliche Geschwindigkeiten, die temporären Änderungen unterliegen können (Staus, Baustellen, Tempolimits, etc.).
- Knoten bieten die Möglichkeit, ab- und aufzuladen. Weiterhin entstehen an den Knoten Güter, die eines Transportes bedürfen.
- Güter müssen vom Start- zum Zielpunkt transportiert werden, wobei Letzterer sich ändern kann.
- Güter besitzen weiche Liefer- und Abholzeitfenster, die sich ändern können.
- Güter besitzen unterschiedliche Größen und Gewichte, weiterhin können sie durch spezielle Eigenschaften an bestimmte Fahrzeuge gebunden sein (z.B. Kühl- und Gefahrgut) und Prioritäten aufweisen.

- Fahrzeuge variieren in der Anzahl, Geschwindigkeit und Kapazität. Sie können spezielle Rückkehrbedingungen oder Beschränkungen auf bestimmte Routen besitzen.
- Objekte können individuelle Zielfunktionen haben, auch bei gleichem Objekttyp.

Fahrzeuge und Güter besitzen innerhalb des Szenarios unterschiedliche Ziele, z.B. möchten die Stückgüter die zurückgelegte Strecke zum Ziel minimieren und die Fahrzeuge die Auslastung ihrer Kapazität maximieren. Hierbei handelt es sich um widersprüchliche Ziele, da eine gute Auslastung lange Strecken bedingt und umgekehrt. Um hier einen Ausgleich zu schaffen, können in den individuellen Zielfunktionen sekundäre Ziele integriert werden, die die globalen Ziele ergänzen. Vereinfacht, unter Annahme homogener Güter und Fahrzeuge, ließe sich der Zusammenhang zwischen den individuellen Zielen der Objekte und den globalen Zielen des Systems so definieren [87]:

$$\sum \text{alleFahrzeuge}_j d_j = \frac{\text{Stückgutgrösse}}{\text{Fahrzeugkapazität}} \cdot \frac{\sum \text{Stückgüter}_i p_i}{\sum \text{Fahrzeuge}_j u_j \cdot \frac{d_j}{\sum d_j}} \quad (2.1)$$

mit

d_j : gefahrene Strecke des Fahrzeuges j

p_i : gefahrene Strecke des Stückgutes i

u_j : Auslastung des Fahrzeuges j

DLRP Fertigungslogistik

Das DLRP_p betrachtet die Wegfindung von Aufträgen durch Produktionsstätten oder -netzwerke. Die Struktur besteht aus den Objekttypen Aufträge und Maschinen. Erstere stellen in dem Fertigungsszenario die mobilen logistischen Objekte da, letztere entsprechen den Netzwerkknoten, erweitert um die Entscheidungsfähigkeit hinsichtlich der lokalen Bearbeitungsreihenfolge von Aufträgen [89]. Ein DLRP_p-Szenario ist durch folgende Grundannahmen definiert [87]:

- Die zugrundeliegende Problemstellung ist architekturenspezifisch und kann z.B. durch einen Flexible Flowshop, einen Flexible Jobshop oder eine Open Shop Architektur abgedeckt werden.
- Aufträge haben entweder eine feste Arbeitsgangfolge mit möglichen parallelen Maschinen oder eine variable Arbeitsgangfolge, können jedoch auch beides aufweisen.
- Die Auftragseinlastung kann statisch oder dynamisch sein. Die Aufträge müssen nicht a priori bekannt sein.
- Es kann verschiedene Auftragsarten geben, die verschiedene, veränderliche Fertigstellungstermine haben.
- Aufträge können Prioritäten besitzen oder eine Dringlichkeit zugewiesen bekommen.
- Aufträge können unterbrechbar sein und Reihenfolgebeziehungen besitzen.
- Die Rüstzeiten hängen von Auftragsart, Maschine und Auftragsreihenfolge ab.
- Es kann Maschinenausfälle und Stillstände durch Wartung, etc. geben.
- Maschinen entscheiden zur Laufzeit über die lokale Auftragsreihenfolge und können beschränkte Puffer aufweisen.
- System- und Objektziele können sich jeder Zeit ändern.

Im Rahmen dieser Szenarios trachten Aufträge allgemein nach einer Minimierung ihrer individuellen Durchlaufzeit, während Maschinen ihre Auslastung maximieren möchten. Beide Ziele sind konfliktierend und können nicht vollständig aufgelöst werden. Dieser Umstand wird als Dilemma der Ablaufplanung bezeichnet [90]. Trotzdem wird diese Zielstellung in der Operations Research häufig gewählt, da sie zu einer Optimierung der Produktionsdauer führt [87].

In der vorliegenden Arbeit findet nur das DLRP_t als Grundlage der Wegfindung autonomer logistischer Objekte in der Veranstaltungslogistik Verwendung, daher wird auf weiterführende Betrachtungen verzichtet.

Kapitel 3

Anwendungsszenario

Das Hauptaugenmerk der vorliegenden Arbeit ist die Adaption und kombinierte Anwendung der in Kapitel 2 eingeführten Methoden aus dem Bereich der Selbststeuerung im Rahmen eines Praxisfalls aus der Veranstaltungslogistik. Die folgenden beiden Abschnitte geben eine allgemeine Übersicht über die Rahmenbedingungen und Herausforderungen des betreffenden Geschäftsfeldes und führen den Praxisfall ein, an dessen spezifischen Problemstellungen das vorgestellte Dispositionssystem ausgerichtet ist.

3.1 Veranstaltungslogistik

Das Anwendungsfeld der Veranstaltungslogistik stellt einen Unterprozess des Veranstaltungsmanagements dar [91]. Dieses befasst sich mit der künstlerischen Planung, der Organisation sowie der logistischen Durchführung von Veranstaltungen [92]. Das Spektrum reicht hier, je nach Spezialisierung des jeweiligen Veranstaltungsunternehmens, von privaten Feirlichkeiten über Firmenjubiläen bis hin zu öffentlichen Veranstaltungen wie Konzerten oder Kundengebungen.

Die logistischen Dienstleistungen im Umfeld des Veranstaltungsmanagements konzentrieren sich in der Regel auf den Verleih und Transport von Veranstaltungsausrüstung einschließlich des Auf- und Abbaus an den Veranstaltungsorten [18]. Hierbei zirkulieren die Leihartikel in einem geschlossenen dynamischen Netzwerk zwischen dem oder den Lagern des Veranstaltungsunternehmens und einem oder mehreren Veranstaltungsorten, die temporär Knoten im

logistischen Netzwerk bilden. Hohe Kundenanforderungen bezüglich der Termintreue, der Flexibilität, des Preis/Leistungs-Verhältnisses, der Artikelqualität sowie der technischen Zuverlässigkeit üben hierbei einen großen Druck auf die Veranstaltungsunternehmen aus, ihre Prozesse effizient zu gestalten.

Die betriebswirtschaftliche Umsetzung erfolgt in der Bestrebung, die Auslastung von Transportmitteln (z.B. LKW, Kleintransporter, Lieferwagen) sowie die Nutzungsrate von Verleihartikeln zu maximieren und die Anzahl der Fahrten, die Länge der Transportwege sowie den Handhabungsaufwand zu minimieren [93].

Dies induziert Zielkonflikte, da eine Fahrtenreduktion Mobilitätseinschränkungen der Verleihartikel bzw., vice versa, eine hohe Nutzungsrate der Verleihartikel unter Umständen volumenreduzierte und damit in ihrer Effizienz verminderte Transporte bewirken würde. Um die Intensität dieses Zielkonfliktes zu vermindern, werden Verleihartikel zum Teil nicht mehr in das Lager rückgeführt, sondern bei räumlicher und zeitlicher Nähe direkt zu der Folgeveranstaltung verbracht [93]. Dies erhöht jedoch die Komplexität der Disposition, der Transportwegeplanung und, wegen der manuellen Artikelerfassung an den Veranstaltungsorten, auch der Bestandsführung [94].

Erschwerend hinzu kommen Umweltdynamiken, die aus Auftragsmodifikationen, technischen Ausfällen, Diebstählen von Ausrüstung und Verspätungen resultieren. Sie verhindern die Realisierung einer zuvor erfolgten Ressourcenallokation und erfordern eine ereignisdynamische Disposition, was eine Zunahme des Dispositionsaufwandes im Verhältnis zur Häufigkeit der auslösenden Ereignisse beinhaltet [22, 95, 96].

3.2 Praxisfall

Bei dem betrachteten Praxisfall handelt es sich um eine inhabergeführte Full-Service Agentur aus dem Bereich des Veranstaltungsmanagements mit 60 Mitarbeitern [18]. Die Firma befindet sich im Streubesitz und operiert von ihrem Hauptsitz in Norddeutschland aus, an dem sich auch das Hauptlager für Veranstaltungsausrüstung befindet und betreibt zusätzlich sechs Außenstellen für Kundenbetreuung und Werbezwecke im Bundesgebiet [97]. Die angebotenen Dienstleistungen umfassen alle Tätigkeiten für die Planung und Durchfüh-

rung von Veranstaltungen im privaten und geschäftlichen Bereich, das Portfolio reicht hier von gesellschaftlichen Anlässen über Firmenfeiern und Produktpräsentationen bis hin zu Messen und Ausstellungen [95]. Der Umsatz des Unternehmens bewegt sich im neunstelligen Bereich (ca. sieben Millionen Euro im Jahr 2009), es stellt somit ein typisches Kleines oder Mittelständisches Unternehmen (KMU) dar.

Das Hauptgeschäftsfeld des Unternehmens zerfällt in die künstlerischen Planungen und die für deren Umsetzung notwendigen logistischen Dienstleistungen inklusive der Vermietung der benötigten Veranstaltungsausrüstung. Letztere reicht von einfachen Verbrauchsmaterialien (Servietten, etc.) über Mobiliar (Tische, Bänke, Stühle) und Cateringbedarf bis hin zu kompletten Bühnen und der zugehörigen Technik [18, 97]. Der verfügbare Artikelstamm umfasst, inkl. Verbrauchsmaterialien, ca. 130.000 Artikel. Der Transport der Leihartikel wird mit dem firmeninternen Fuhrpark durchgeführt, dieser umfasst zwei Lieferwagen (3,5 Tonnen), drei LKW mit 7,5 Tonnen und einen LKW mit 40 Tonnen Nutzlast sowie vier PKW für den Transport von Personal und Kleingeräten. Die auftragsbezogene Disposition von Ressourcen obliegt einem Experten. Dieser betrachtet jeden Auftrag (=Veranstaltung) als ein Projekt und fungiert vom Auftragseingang bis zur Rechnungsstellung als Projektmanager. Die Ressourcenzuweisung erfolgt auf Basis der Vorplanungen, die wiederum auf den Wünschen des Kunden und den Begebenheiten am Veranstaltungsort basieren [93]. Diese Grobplanung wird im Laufe des Planungsprozesses in eine Feinplanung überführt, die eine konkrete Geräteauswahl, die Kommissionier- und Packlisten sowie die Personalplanung enthält. Die Planung erfolgt ausschließlich manuell, eine automatisierte Unterstützung durch Softwaresysteme findet derzeit nicht statt. Einzige Ausnahme ist eine Verfügbarkeitsübersicht im Enterprise Resource Planning (ERP)-Programm des Unternehmens, das ähnlich eines Gantcharts die Verfügbarkeit von Leihartikeln auf einer Zeitleiste darstellt. Die Funktionalität des ERP beschränkt sich ansonsten auf die Verwaltung der Warenbestände des Zentrallagers, eine auftragsbasierte Disposition für eine oder gar mehrere interdependente Veranstaltungen ist nicht möglich.

Entsprechend gestaltet sich die Planung und die zugehörige Disposition, gerade unter dynamischen Einflüssen, sehr schwierig. Als dynamische Einflüsse sind

Neuaufträge, Auftragsänderungen, Diebstähle von Veranstaltungsausrüstung, bzw. Schäden an dieser oder den Transportmitteln zu sehen. Diese machen die Umsetzung einer bestehenden Planung unmöglich und erfordern eine Neuplanung unter Berücksichtigung der veränderten Gegebenheiten [18]. Die Neuplanung findet häufig unter Zeitdruck statt, wenn die zu disponierenden Veranstaltungen zeitnah stattfinden sollen und wird zusätzlich durch eine mangelnde Informationslage bzgl. der Artikelstandorte und des jeweiligen Artikelzustandes erschwert. Die Verfügbarkeit von Artikeln wird, wie bereits erwähnt, nur rudimentär über das ERP des Unternehmens abgebildet. Die hier enthaltenen Informationen stehen zusätzlich nur für Gegenstände zur Verfügung, die sich zum Planungszeitpunkt im Zentrallager befinden. Materialbewegungen an und zwischen Veranstaltungsorten werden nur manuell dokumentiert, eine automatisierte Erfassung findet nur am Warenaus- und eingang des Lagers statt [93]. Zwar werden für die Ver- und Entladevorgänge Packlisten geführt, die Ein- und Ausladevorgänge, an Veranstaltungsorten bedürfen aber eines manuellen Abgleichs mit der für den Auftrag erstellten Packliste. Da der Auf- und Abbau am Veranstaltungsort in der Regel unter großem Zeitdruck steht und sich ein Großteil der Verleihartikel gebündelt in Ladungsträgern befindet, werden die ein- und ausgehenden Materialbewegungen in die bzw. aus den Transportmitteln nur ungenügend dokumentiert [93]. Dieser Umstand verschärft sich durch die Beteiligung unterschiedlichen Personals für Auf- und Abbau. Wissen über Position und Umfang der Verleihartikel werden von der Aufbau- nicht in die Abbauphase transferiert. Als Konsequenz werden Defekte und Diebstähle erst spät erkannt. Sollte ein solcher noch am Veranstaltungsort festgestellt werden, gibt es keine Möglichkeit der elektronischen Übermittlung, so dass Informationen über defekte oder fehlende Geräte entweder fernmündlich (bei Dringlichkeit) oder erst bei der Rückkehr des Transportmittels zum Zentrallager bzw. beim Aufbau auf einer Folgeveranstaltung (bei Feststellung des Defektes/Verlustes) an die Zentraldisposition übermittelt werden. Dies führt zu Informationsasymmetrien, die den verantwortlichen Projektmanager bei bereits disponierten, aber derzeit nicht einsatzfähigen Verleihartikeln in Zeitdruck versetzen, Ersatz zu organisieren.

Ebenso tritt der Fall auf, dass Verleihgegenstände auf einer Veranstaltung nicht benötigt und wieder zurück ins Lager verbracht werden. Da ihre Verfügbarkeit

erst mit Lagereingang im System verbucht wird, kann es passieren, dass für parallele oder kurz darauf beginnende Veranstaltungen, die den gleichen Artikeltypus benötigen, unnötigerweise Fremdmaterial geliehen wird [18].

Diese Zumietungen von Veranstaltungsausrüstung werden zur Handhabung von Auftragsspitzen auch auf die Transportkapazitäten ausgedehnt, was die zeitliche Abstimmung der Planungen und der Veranstaltungsdurchführung weiter verkompliziert und zu entsprechenden Kosten führt [98]. Die Senkung dieser Kosten und die Erhöhung der Robustheit, Flexibilität und Effizienz der Logistikprozesse des Beispielunternehmens bilden die Ziele des in den folgenden Kapiteln entwickelten selbststeuernden Dispositionssystems für die Veranstaltungslogistik.

3.3 Anforderungen an das Distributionssystem

Aus den allgemeinen Gegebenheiten in der Veranstaltungslogistik und den Spezifika des Praxisfalles lassen sich die wesentlichen Anforderungen an eine selbststeuernde Disposition ableiten. Diese umfassen den effizienten und robusten Umgang mit den gegebenen Ressourcen Verleihartikel, Transportmittel und Personal unter dynamischen Bedingungen [18]. Das System soll den Projektverantwortlichen bei den Planungen unterstützen und den Planungsaufwand, gerade bei gehäuft notwendigen Neuplanungen, reduzieren. Hierzu ist die Ressourcenallokation und die auf ihr basierende Auftragsdurchführung in Teilaufgaben zu gliedern und mit den eingangs skizzierten Selbststeuerungsmethoden zu lösen. Tabelle 3.1 stellt den verschiedenen Teilproblemen die jeweiligen Herausforderungen und die entsprechenden Ansatzpunkte der Selbststeuerungsmethoden entgegen [99]. Das Teilproblem der Ressourcenallokation betrifft die Realisierung der Feinplanung für jede Veranstaltung, basierend auf den vorangegangenen Grobplanungen und der aktuellen Verfügbarkeit der angeforderten Veranstaltungsausrüstung und Transportmittel. Hinsichtlich der Planungsfunktionen ist die dynamische verhandlungsbasierte Auftragsdisposition durch PlaSMA zentraler Punkt des Anforderungsprofils [97].

Hier muss eine konkrete Zuweisung von Artikeln zu Veranstaltungen vorgenommen werden, wobei die Auswahl aus einem großen Artikelstamm zu treffen ist, der sich im Zentrallager sowie dezentral an wechselnden Veranstaltungsorten

befindet. Hierbei muss bei der Zusammenstellung der Transporte Rücksicht auf fehlende oder defekte Artikel genommen werden, weiterhin ist die bestehende Informationsasymmetrie zwischen Zentrallager und Veranstaltungsorten durch den Einsatz geeigneter Hardware aufzuheben, um eine dezentrale Disposition unter Berücksichtigung der an den Veranstaltungsorten verfügbaren Ressourcen zu ermöglichen [100].

Tabelle 3.1: Teilprobleme und selbststeuernde Lösungsansätze [99]

Aufgabe	Herausforderungen	Lösungsansatz
Allokation von Ressourcen zu Aufträgen	Komplexes Planungsproblem durch Artikelanzahl und wechselnde Veranstaltungsorte	Verhandlungsbasierter Ansatz zur dezentralen Allokation durch Softwareagenten (PlaSMA)
Transportplanung	Fehlende/defekte Artikel Mangelnde Informationstransparenz	Selbststeuernde Routenplanung (DLRP, PlaSMA) Prozessüberwachung (Hardware)
Disposition/Transport	Verkehrssituation Pickup and Delivery Problem Routen- und Tourenplanung	Selbststeuernde Routenplanung (DLRP) DLRP DLRP
Dokumentation der Ladevorgänge	Fehlende/defekte Artikel Intransparente Ladevorgänge	Automatisierte Dokumentation der Ladevorgänge (Hardware) Elektronische Bestandsführung (Hardware)

Das Disposition und Transport zugrundeliegende Pickup and Delivery Problem ist in diesem Zuge durch Anwendung des DLRP so zu lösen, dass die Terminrestriktion eingehalten und der vorherrschenden Verkehrssituation bei unverminderter Effizienz der Routen weitestmöglich Rechnung getragen wird [101].

Aus funktionaler Perspektive muss das System in der Lage sein, die Bestandsdatenbank des ERP automatisiert auszulesen, bzw. eine eigene inhaltlich identische Datenbank im Rahmen der PlaSMA-Szenarien anzulegen und zu verwalten. Weiterhin muss das System die Auftragsdaten aus dem ERP übernehmen können oder eine Möglichkeit zur manuellen Eingabe der Auftragsdaten, z.B. Ort und Zeit der Veranstaltung, besitzen. Analog kann die Übertragung der Planungsergebnisse in das ERP automatisiert oder über eine äquivalente Ausgabe von Pack- und Kommissionierlisten sowie Personalplanung und Fahrtrouten erfolgen. Die Ausweitung der automatisierten Bestandsführung auf die Veranstaltungsorte ist durch den Einsatz geeigneter Hardware (Telematik) sicherzustellen [100]. Dieses Hardwaremodul muss in der Lage sein, die Ladebewegungen vor Ort zu dokumentieren, wobei nach Ein- und Ausladevorgängen zu unterscheiden ist. Die akquirierten Daten müssen so aufbereitet werden, dass sie im Rahmen einer PlaSMA-Simulation verarbeitet werden können. Die Übertragung der Daten hat zeitnah zu erfolgen und muss neben den Ladebewegungen noch den Ort und die Uhrzeit der aufgenommenen Materialflüsse enthalten. Strukturell ist die Telematik so auszuführen, dass sie sowohl mit dem Fuhrpark des Beispielunternehmens als auch mit Mietfahrzeugen kompatibel ist. Letzteres bedingt eine schnelle Montage und rückstandslose Entfernung sowie eine vom Bordnetz autarke Stromversorgung [93].

Als Gesamtanforderung für die Hard- und Softwarekomponenten des Dispositionssystems gilt die Integrierbarkeit in die Prozesslandschaft und die technische Infrastruktur des Anwendungspartners.

Kapitel 4

Konzeptentwicklung und Implementierung

In diesem Kapitel wird das Konzept des selbststeuernden Dispositionssystems für die Veranstaltungslogistik entworfen. Hierfür fließen die Erkenntnisse einer detaillierten Prozessaufnahme im Beispielunternehmen und die im vorherigen Kapitel formulierten Anforderungen an das System in ein ALEM-Model ein. Dieses Modell dient als Grundlage für die Implementierung auf Basis der Methoden, bzw. Werkzeuge, PlaSMA und DLRP. Zusätzlich zu den Details der Implementierung wird begleitend ein Konzept für die Integration des Systems in die Prozesse und die technische Infrastruktur des Beispielunternehmens entwickelt und vorgestellt.

4.1 Ist-Prozessaufnahme

4.1.1 Veranstaltungsdurchführung

Die Aufnahme der Ist-Prozesse im Beispielunternehmen wurde in Form von Ortsbesichtigungen im Lager und Interviews mit den Verantwortlichen für die Planung und Durchführung von Veranstaltungen durchgeführt. Ferner wurde die Ausführung eines Referenzprojekts begleitet, um die Vorgehensweise an den Veranstaltungsorten detailliert aufnehmen zu können. Die Auftragsabwicklung folgt generell einem Mehrphasenmodell, das in sechs Teilabschnitte untergliedert werden kann [18]. Abbildung 4.1 zeigt die einzelnen Phasen in

der Übersicht (eine detaillierte Darstellung ist in Abschnitt A.2.1 des Anhangs zu sehen).

Den Beginn der Auftragsbearbeitung bildet eine vorerst noch unverbindliche Anfrage seitens des Kunden. Diese beinhaltet die Rahmeninformationen zu der gewünschten Veranstaltung, bestehend aus dem Anlass sowie dem Veranstaltungsort und dem betreffenden Datum. Diese Informationen dienen in ersten Kundengesprächen und einer Ortsbesichtigung als Grundlage

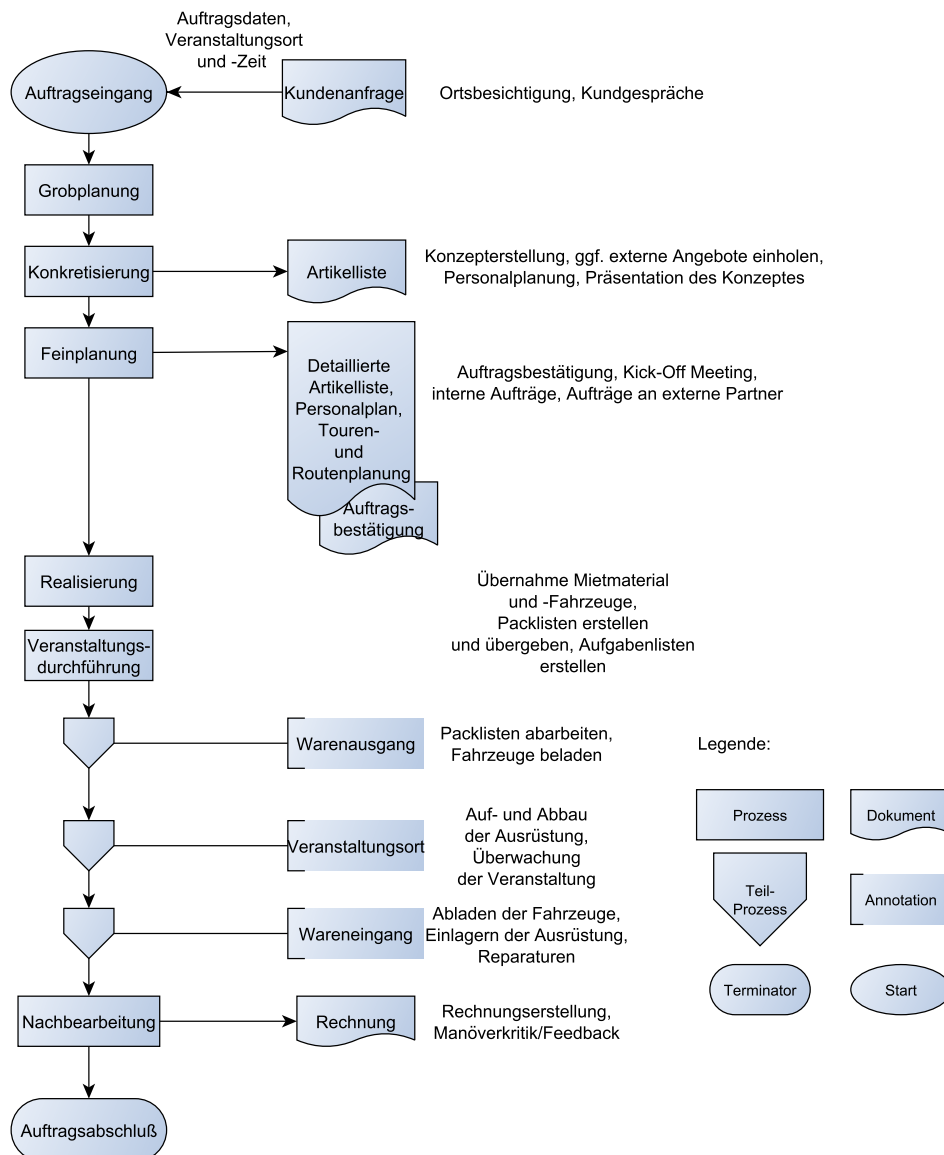


Abbildung 4.1: Phasen der Veranstaltungsausführung nach [18]

der Grobplanungen in Phase 1, die neben ersten künstlerischen Aspekten auch eine vorläufige Artikelliste umfasst. Die Artikelliste enthält zu diesem Zeitpunkt noch keine konkreten Ausrüstungsgegenstände, sondern führt lediglich Artikelfamilien und geschätzte Mengen, wie z.B. eine Bühne, 15 Tische inkl. Bestuhlung, usw., auf. Die Festlegung der genauen Bedarfe ist das Ergebnis der Feinplanungen, die in der Folgephase 2 (Konkretisierung) unter Beteiligung des Kunden durchgeführt werden. In der Konkretisierungsphase werden weiterhin eventuelle externe Angebote für Fremdmaterial eingeholt sowie eine erste Projektkalkulation und eine vorläufige Personalplanung erstellt. Diese Vorplanungen fließen in ein Gesamtkonzept für die Veranstaltung ein, das dem Kunden präsentiert wird und bei dessen Zustimmung zum endgültigen Vertragsabschluss führt.

Nach erfolgter Auftragsbestätigung wird in Phase 3 (Feinplanung) ein Kick-off Meeting abgehalten, in dem die Detailplanungen erarbeitet werden. Diese sind der Ausgangspunkt für die internen Arbeitsanweisungen an die Abteilungen für Logistik, Lager, Technik und Dekoration. Weiterhin werden, falls notwendig, externe Aufträge erteilt, diese umfassen beispielsweise Aufträge an Künstler, Hotelbuchungen oder die Anmietung von Ausrüstung und Transportfahrzeugen.

In Phase 4 (Realisierung) wird die Umsetzung des entwickelten Konzeptes in die Wege geleitet. Hierzu gehört die Übernahme evtl. gemieteten Materials und die Aufnahme der veranstaltungsspezifischen Aufträge in den Wochenarbeitsplan der betroffenen Abteilungen. Abschließend werden die Anweisungen für die Ausführung letztmalig überarbeitet und an das ausführende Personal übergeben. Dies umfasst die Kommissionier- und Packlisten inkl. der Touren-einteilung sowie die Personalpläne. Die Erstellung der für die verschiedenen Phasen notwendigen Dokumente erfolgt über das ERP-System des Unternehmens, die spätere Ausgabe umfasst Ausdrücke auf Papier (z.B. Ladelisten) oder im Falle der Kommissionierlisten die digitale Übertragung auf Mobile Data Entry (MDE)-Geräte. Diese werden im Lager verwendet, um über Barcode oder Radio Frequency Identification (RFID) die zu kommissionierenden Artikel zu identifizieren.

Phase 5 beinhaltet die Veranstaltungsdurchführung, beginnend mit der Zusammenstellung der Lieferungen am Warenausgang. Diese werden entsprechend

der Vorplanungen kommissioniert, verladen und zum Veranstaltungsort verbracht. Dort werden die Transporte entladen und der Aufbau der Ausrüstung in die Wege geleitet. Nach Beendigung der Veranstaltung wird die Ausrüstung abgebaut, verladen und in das Lager zurückgeführt, wo der Wareneingang auf Defekte geprüft, verbucht und wieder eingelagert wird (Phase 6: Nachbereitung). Von nun an stehen die Ressourcen wieder für die Disposition von Folgeaufträgen zur Verfügung. Den Abschluss der Auftragsdurchführung bildet die Rechnungsstellung auf Basis der finalen Kalkulation.

Dieses Phasenmodell ist wie vorgestellt für je eine Veranstaltung, bzw. Auftrag, gültig. In den verschiedenen Phasen der Planung und Durchführung wird jedoch in Abhängigkeit von der Auftragslage eine Abstimmung mit den Bedarfen anderer aktueller Aufträge durchgeführt. So wird bei der Zusammenstellung von Transporten die zeitliche und räumliche Nähe von Veranstaltungen berücksichtigt, so dass diese in kombinierten Touren beliefert werden können. Auch die Anmietung von Material und Transportkapazitäten wird nach Möglichkeit für mehrere Veranstaltungen vorgenommen. Weiterhin findet an den Veranstaltungsorten bereits in geringem Rahmen eine dezentrale Kommissionierung für Folgeveranstaltungen statt. Generell ist anzumerken, dass die Dynamik der Auftragsabwicklung in vielen Fällen durch Improvisation aufgefangen wird, so dass die in den jeweiligen Phasen verorteten Teilaufgaben nicht in jedem Fall in der geschilderten Reihenfolge stattfinden. Auch wird, gerade im Rahmen von Neuplanungen, oftmals ein iterativer Prozess angestoßen, der die wiederholte Ausführung einzelner Teilschritte oder kompletter Phasen beinhaltet.

4.1.2 Prozessschwachstellen

Die Hauptschwachpunkte der Prozessdurchführung im Beispielunternehmen betreffen zwei Bereiche; die mangelnde Flexibilität der zentralen Planungsinstanz hinsichtlich des Umganges mit dynamischen Ereignissen und der daraufhin notwendigen Neuplanung der Veranstaltungen sowie die mangelnde Informationstransparenz hinsichtlich Zustand und Aufenthaltsort der Artikel (vgl. Abschnitt 3.2). Die resultierenden prozessualen Schwachstellen in der Planung und Durchführung von Veranstaltungen betreffen die Phasen 3 (Feinplanung) bis einschließlich 5 (Veranstaltungsdurchführung).

Auf Abbildung 4.2 sind die betreffenden Phasen und die zugehörigen Schwach-

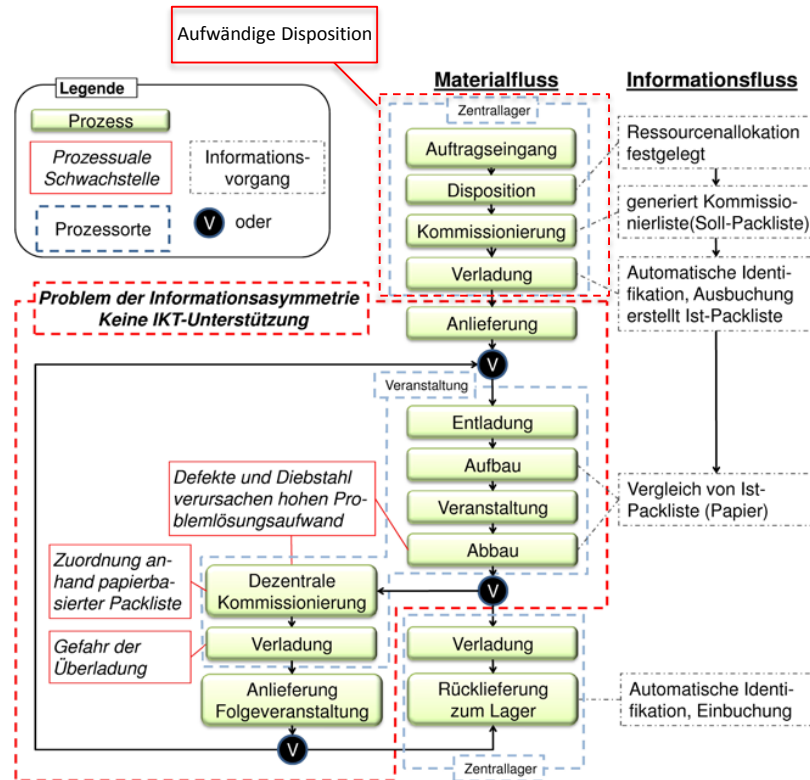


Abbildung 4.2: Prozessuale Schwachstellen im Beispielunternehmen [18, 93, 97]

stellen im Hinblick auf die Material- und Informationsflüsse skizziert. Die Disposition in Phase 3 stößt durch die häufig notwendigen Neuplanungen und die mangelhafte Unterstützung der Disponenten durch geeignete Software an ihre Grenzen. Als Resultat gelingt es in vielen Fällen nicht, die ausstehenden Aufträge ohne Einsatz von Fremdmaterial effizient zu disponieren. Die Umsetzung der Disposition aus Phase 3 wird durch mangelnde Dokumentation der Materialbewegungen an den Veranstaltungsorten in Phase 5 weiter erschwert. Dies ist in zweierlei Hinsicht der Fall; zum einen basieren die Planungen möglicherweise bereits von vorneherein auf unvollständigen Informationen, zum andern haben mögliche Fehlverladungen oder Ressourcenausfälle evtl. zu Problemen bei der dezentralen Kommissionierung auf vorherigen Veranstaltungen geführt, so dass weitere Abweichungen von der ursprünglichen Ressourcenallokation auftreten. Diese verursachen einen hohen Problemlösungsaufwand, verzögern die Prozessausführung und führen als Resultat zu übermäßig- oder unzureichend ausgelasteten Transporten mit entsprechend erhöhten Kosten.

4.2 Soll-Konzept

Die erkannten prozessualen Schwachstellen lassen sich in zwei Teilbereiche aufgliedern. Der Erste betrifft die allgemeine Problematik der Veranstaltungslogistik hinsichtlich der Dynamik und Komplexität bei der Auftragserteilung und -durchführung, der Zweite fußt auf den diesbezüglichen Herausforderungen innerhalb des betrachteten Beispielunternehmens. Der im Folgenden formulierte Soll-Prozess betrachtet die kombinierte Lösung der erkannten Probleme auf beiden Ebenen und führt diese in einem selbststeuernden Dispositionssystem für die Veranstaltungslogistik zusammen. Die umsetzungsspezifischen Parameter sind hierbei auf die Begebenheiten des Beispielunternehmens ausgerichtet. Die Herausforderung der Veranstaltungslogistik liegt in der Ausführung komplexer, untereinander zeitlich und räumlich dependenter Aufträge mit begrenzten Ressourcen in einem dynamisch veränderlichen Logistiksystem [18, 27]. Die Schwierigkeit liegt hierbei in der Handhabung dynamischer Effekte in der Auftragsdisposition, die bereits erfolgte Ressourcenallokationen und Planungsstände hinfällig werden lässt. Um die wiederholte Neuplanung unter Berücksichtigung aller Abhängigkeiten durchzuführen, bedarf es einer leistungsfähigen und adaptiven Planungsinstanz.

Im betrachteten Beispielunternehmen obliegen alle planerischen Tätigkeiten einem oder bei großen Auftragszahlen mehreren Disponenten, die die betreffenden Aufgaben manuell auf Basis ihres persönlichen Expertenwissens lösen [18]. Die resultierende Planungsergebnisse sind von hoher Güte, solange keine oder nur wenige dynamische Effekte eintreffen und eine ausreichende Zeitspanne für den Planungsprozess zur Verfügung steht. Nehmen die Auftragsvolumina zu und treten vermehrt dynamische Effekte auf, so ist die ereignisdynamische Disposition mit einem großen Aufwand und Zeiteinsatz verbunden. Dies führt in der Praxis des Beispielunternehmens oftmals zu einer ineffizienten Prozessausführung, da der zusätzliche Planungsaufwand durch Neuereignisse nur durch Improvisation aufzufangen ist. Die hier auftretenden Probleme hinsichtlich der Planungskapazität führen zu hohen Folgekosten, da zur Realisierung von Planungslücken auf Fremdmaterial ausgewichen werden muss, bzw. Materialbewegungen mit volumenreduzierten oder unnötig langen Transporten durchgeführt werden [97].

4.2.1 Selbststeuernde Disposition

Zur Lösung der skizzierten Probleme wird die selbststeuernde Disposition in den bestehenden Prozessablauf des Beispielunternehmens integriert. Dieses Vorgehen erfordert keine grundsätzliche Umstrukturierung der Abläufe und erleichtert somit die prozessuale Umsetzung des Selbststeuerungsansatzes. Die Modifikationen im Soll-Prozess setzen in Phase 3 bei der Feinplanung an und beeinflussen die Planungsprozesse bis in Phase 5 hinein (siehe Abbildung 4.3). Hier stehen die Rahmenparameter des zu disponierenden Projektes fest und können als Grundlage für die Feinplanung herangezogen werden [95]. Der Soll-Prozess sieht hier eine Unterstützung des Disponenten durch das selbststeuernde Dispositionssystem auf Basis von PlaSMA und DLRP vor.

Phase der Veranstaltungsdurchführung	Aktivitäten
Phase 1: Akquise/Ideenfindung	Kundenanfrage/Ortsbesichtigung/Erste Gespräche
Phase 2: Konkretisierung	Konzeptgenerierung/Grobplanung
Phase 3: Feinplanung	Definition von Meilensteinen/Ressourcenplanung/Buchungen/Feinkalkulation/Anzahlung
Phase 4: Realisierung	Durchführung/Anmietungen/Personalplanung/interne Aufträge
Phase 5: Veranstaltungsdurchführung	5.1 Zentrallager: Kommissionierung/Beladen
	5.2 Veranstaltungsort: Entladen/Aufbau/Veranstaltung/Abbau/Mögliche Kommissionierung für Nachfolgeveranstaltungen/Beladen
	5.3 Zentrallager: Entladen/Einlagern
Phase 6: Nachbereitung	Rechnungsstellung/Feedback

- Personalplanung
- Zuweisung von Ausrüstung
- Transportplanung
- Routenplanung
- Dezentrale Kommissionierung
- Datenerfassung am Veranstaltungsort

Abbildung 4.3: Ansatzpunkte des selbststeuernden Soll-Prozesses [95, 97, 102]

Das System übernimmt die Daten der Grobplanung, bestehend aus Veranstaltungsort und -zeit sowie der Artikelliste und überführt diese im Rahmen der Multiagentensimulation in eine detaillierte Planung aus Kommissionier-, Pack- und Ladelisten. Ferner erstellt das System die Routen für die Transportfahrzeuge und generiert den korrespondierenden Personaleinsatzplan [18]. Ist eine Disposition mit den zur Verfügung stehenden Ressourcen nicht möglich, endet die Simulation mit einer entsprechenden Fehlermeldung an den Disponenten.

Dieser hat nun die Möglichkeit, die Anmietung von Ressourcen zu autorisieren. Das Szenario für die PlaSMA-Simulation wird nun entsprechend ergänzt und erneut simuliert. Kommt erneut keine Lösung zustande, können seitens des Disponenten weitere Ressourcen freigegeben werden.

Ein vergleichbarer iterativer Ansatz wird für den Umgang mit dynamischen Ereignissen während der Disposition gewählt. Tritt ein Ereignis ein, das eine Neuplanung erforderlich macht, so wird das Simulationsszenario entsprechend modifiziert und eine erneute Simulation durchgeführt, bis eine Lösung der gewünschten Güte gefunden ist [99]. Abbildung 4.4 zeigt den generellen Ablauf der selbststeuernden Disposition als Schema.

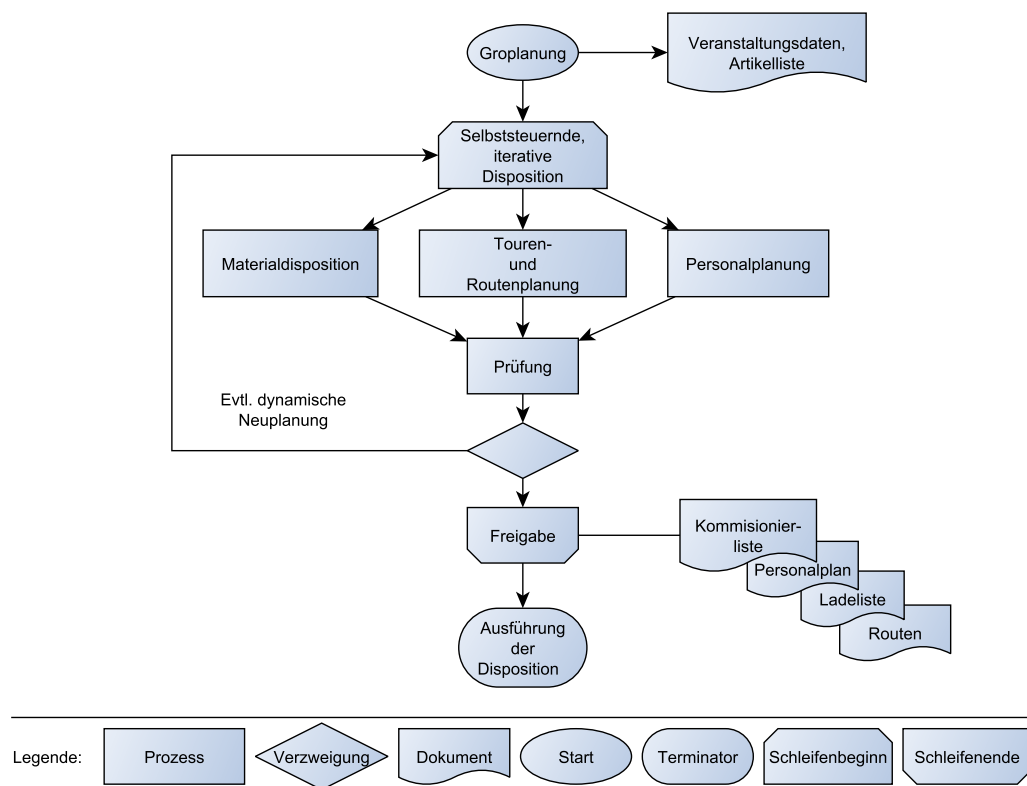


Abbildung 4.4: Ablauf des selbststeuernder Soll-Prozesses nach [95, 97]

Der Disponent bleibt weiterhin Hauptverantwortlicher für die Planungen, greift jedoch nur ein, wenn zusätzliche Ressourcen genehmigt oder das PlaSMA-Szenario modifiziert werden muss. PlaSMA arbeitet während der Disposition auf Daten aus dem ERP des Beispielunternehmens. Die Bestandsdaten inkl. des Artikelstammes und die Auftragsdaten werden hierzu aus dem ERP gespie-

gelt, um Inkonsistenzen durch etwaige gleichzeitige Zugriffe in beiden Systemen zu vermeiden. Der Grad des automatisierten Datenaustausches korreliert hier mit dem gewählten Integrationsgrad. Die hier möglichen Verfahrensweisen werden in Kapitel 4.6.2 näher beleuchtet.

Die Weitergabe der Planungsergebnisse erfolgt, wie gehabt, direkt an die Verantwortlichen in den Fachabteilungen für Lager, Logistik und Personal. Die PlaSMA-Simulation berücksichtigt bei der Disposition sowohl die im Lager zentral verfügbaren als auch die dezentral an den Veranstaltungsorten befindlichen Ressourcen.

4.2.2 Informationstransparenz

Die Verfügbarkeit aktueller planungsrelevanter Informationen stellt eine wichtige Grundlage und Voraussetzung für die Entscheidungsfindung selbststeuernder Objekte dar. Die Qualität der verfügbaren Daten beeinflusst direkt die Güte der auf ihrer Basis getroffenen Planungsentscheidungen. In der vorliegenden Arbeit benötigen die logistischen Objekte der Veranstaltungslogistik Informationen über ihre Position, ihren Zustand, die Parameter der Aufträge, für die sie in Frage kommen und bestehende Transportmöglichkeiten innerhalb des logistischen Netzwerkes [93].

Im betrachteten Anwendungsfall werden die benötigten Informationen derzeit dem ERP-System entnommen. Sie basieren auf den Auftragsdaten und den an den Lagerausgängen dokumentierten Materialflüssen, ergänzt um mündlich oder schriftlich erfasste Vorgänge an den Veranstaltungsorten (siehe Abschnitte 4.1 und 4.1.2). Hierbei besteht zwischen dem im System dokumentierten Materialbestand und den tatsächlichen verfügbaren Ressourcen eine große Abweichung. Diese liegt in der unzureichenden Dokumentation der Materialbewegungen an den Veranstaltungsorten begründet und führt häufig zu unnötigen Anmietungen von Fremdmaterial und ineffizienten Transporten. Um die Güte der Planungsentscheidungen zu erhöhen, muss die Bereitstellung aktueller und umfassender Planungsdaten sichergestellt werden [101].

In der vorliegenden Arbeit wird hierzu ein Hardwaremodul entwickelt, welches die Dokumentation der Materialflüsse an den Veranstaltungsorten sicherstellt und weiterhin in der Lage ist, die gewonnenen Informationen aufzubereiten und an das selbststeuernde Dispositionssystem zu übertragen. Um den Anfor-

derungen der Prozesse im Beispielunternehmen zu genügen, ist das Modul als mobile Telematikeinheit ausgeführt. Diese kann an den Fahrzeugen des Unternehmens mit wenigen Handgriffen befestigt und genauso schnell wieder entfernt werden. Auf diese Weise wird eine Nutzung mit Mietfahrzeugen ermöglicht, an denen keine dauerhaften Modifikationen oder Umbauten vorgenommen werden können [93]. Der Transport zwischen den Veranstaltungsorten erfolgt im Laderaum.

Für die Teilaufgaben in der mobilen Informationserfassung ist das Modul mit den folgenden Technologien aus dem Bereich Information und Kommunikation (IuK) ausgestattet (Tabelle 4.1). Die Identifikation der bewegten Veranstaltungsausrüstung erfolgt wie im Zentrallager über die bereits auf den Objekten aufbrachten RFID-Tags. Zur Unterscheidung der Materialflussrichtung in Be- und Entladevorgänge kommen Bewegungsmelder zum Einsatz, die über die Reihenfolge ihrer Aktivierung auf die Laderichtung schließen.

Tabelle 4.1: Ausstattung des Hardwaremoduls [93]

Teilaufgabe	Technologie
Identifikation	RFID-Reader und -antenne
Positionsermittlung	GPS-Empfänger (GPS)
Erfassung der Materialflussrichtung	Bewegungsmelder (Infrarot)
Datenaufbereitung	Industrie-PC
Datenübertragung	UMTS-Modul (UMTS)

So wird bei einer Aktivierung des auf die Laderampe gerichteten Bewegungsmelders vor demjenigen, welcher den Laderaum überwacht, auf einen Ladevorgang geschlossen. Eine umgekehrte Aktivierung induziert einen Entladevorgang. Um die Materialflüsse einer Veranstaltung und somit einem Auftrag zuordnen zu können, wird während der Identifikation der Ausrüstung und der Unterscheidung der Bewegungsrichtung die GPS-Position des Moduls erfasst. Somit steht nach dem Abschluss eines Ladevorgangs ein Datensatz zur Verfügung, der die bewegten Objekte, die Laderichtung, die Uhrzeit und die GPS-Position umfasst. Dieser ermöglicht Rückschlüsse auf den aktuellen Auf-

enthaltort der Ausrüstungsgegenstände, so dass eine Disposition für etwaige Folgeaufträge ermöglicht wird [93].

Die Aufbereitung der Datensätze erfolgt durch eine zentrale Recheneinheit, die zusätzlich die Vernetzung der einzelnen Komponenten übernimmt. Hierfür kommt ein Industrie-PC zum Einsatz, welcher neben einem Standardprozessor des Herstellers Intel über standardisierte Schnittstellen wie beispielsweise Universal Serial Bus (USB) oder Ethernet zur Anbindung der Einzelkomponenten verfügt. Die Übertragung der Daten erfolgt über das Mobilfunknetzwerk, unter Nutzung des UMTS-Standards. Sollte die Verbindungsqualität nicht ausreichen, verfügt der Industrie-PC über die notwendigen Kapazitäten zur Zwischenspeicherung. Die Übertragung erfolgt dann bei der nächsten Gelegenheit, so dass die Verzögerung zwischen der Erfassung der Daten und der Verfügbarkeit der Informationen zu Planungszwecken möglichst wenig Zeit vergeht.

Die Energieversorgung des Moduls erfolgt über einen integrierten Akku, der den Betrieb über mehrere Stunden sicherstellt, so dass ein Einsatz über eine komplette Tour mit diversen Veranstaltungen erfolgen kann. Das Laden des Akkus kann beispielsweise in der Nacht erfolgen. Zur Verminderung des Energieverbrauchs sind sämtliche Komponenten neben Kriterien hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit auch nach ihrem Energieverbrauch ausgewählt. Zusätzlich würde zur Sicherstellung einer leichten Montage auf ein möglichst geringes Gewicht und kleine Maße geachtet [93]. Die Struktur des Moduls ist auf Abbildung 4.5 zu sehen.

Die Montage erfolgt an der Laderaumdecke des Fahrzeuges, direkt über der Kante zwischen Laderaum und Laderampe. Dies ermöglicht eine optimale Abdeckung der für die Materialflüsse relevanten Bereiche im Laderaum des Fahrzeuges und auf der Laderampe. Die Ausrichtung ist hierbei so gewählt, dass die Bewegungen in das Fahrzeug hinein und aus dem Fahrzeug hinaus erfasst, Materialbewegungen neben dem Fahrzeug jedoch ignoriert werden. Dies verhindert, dass bereits entladenes Material beim Vorbeiführen am Fahrzeug erneut erfasst und einem Ladevorgang zugeordnet wird (sog. False Positives = Fehlerkennungen). Die hierfür notwendige Justierung der Modulkomponenten ist das Ergebnis von Testläufen, die mit einem LKW von 7,5t durchgeführt wurden, wie er bei dem Beispielunternehmen zum Einsatz kommt. Die Ladebewegungen erfolgten mit typischen Objekten, wie sie im Bestand des Bei-

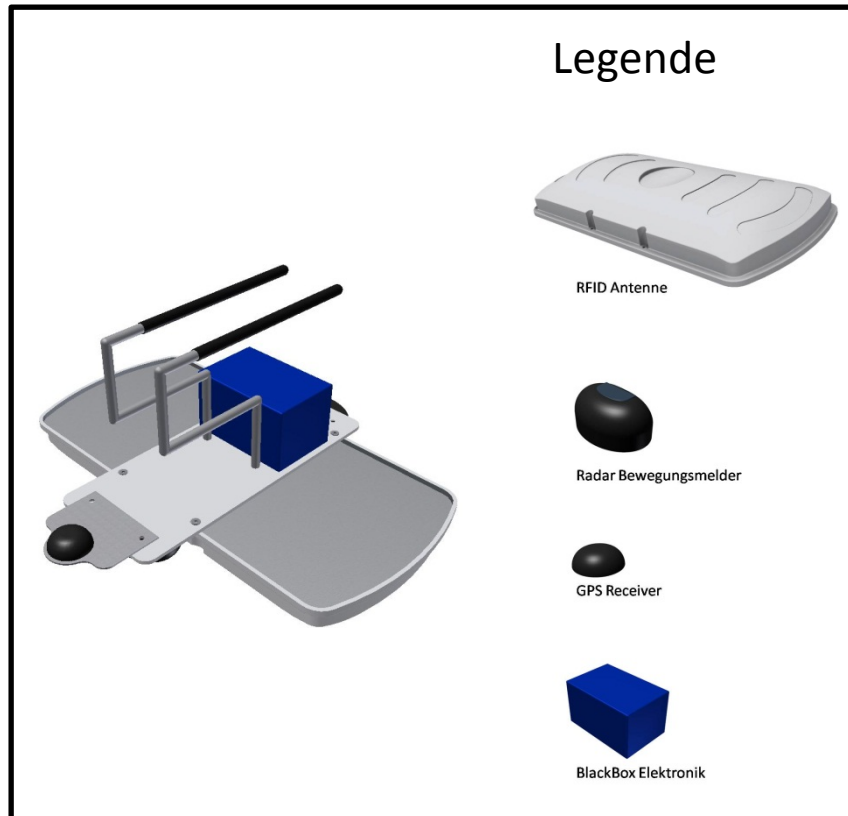


Abbildung 4.5: Schematische Darstellung des Hardwaremoduls zur Informationserfassung [99, 102]

spielunternehmens Verwendung finden. Hierzu zählen Rollwagen, Boxen und Paletten mit gebündelten Stückgütern (Stühle, etc.) [102]. Die Details zu den Tests des Hardwaremoduls unter Laborbedingungen finden sich in Kapitel 5.1.

4.3 ALEM-Modell

Das ALEM-Modellierungskonzept stellt die Grundlage für die Entwicklung eines selbststeuernden logistischen Systems in der Veranstaltungslogistik dar [18]. Das ALEM-Modell der Veranstaltungslogistik ist hierbei der Ausgangspunkt für die Simulation mit PlaSMA [97]. In den folgenden Abschnitten werden die in Kapitel 2.4.2 vorgestellten Modellierungsschritte durchlaufen und jeweils einzeln oder thematisch zusammengefasst erläutert. Zielstellung ist ein detailliertes Modell des selbststeuernden Dispositionssystems auf Grundlage der ALEM-Methodologie.

4.3.1 Ziele

Ausgangspunkt der Modellierung gemäß ALEM ist die Definition der zu erreichenden Ziele. Hierbei ist zwischen den globalen Zielen des Gesamtsystems und den lokalen Zielen einzelner Teilsysteme oder Objekte zu unterscheiden. Der generelle Zusammenhang zwischen beiden Zielebenen besteht darin, dass jedes globale Ziel in mehrere Teilziele zerfällt, deren Erfüllung in Summe auch die Erfüllung des übergeordneten Ziels bedingt. Abbildung 4.6 zeigt die globale Zielstellung des selbststeuernden Dispositionssystems. Übergeordnetes Ziel des Systems ist die Realisierung einer dynamischen und robusten Planung unter

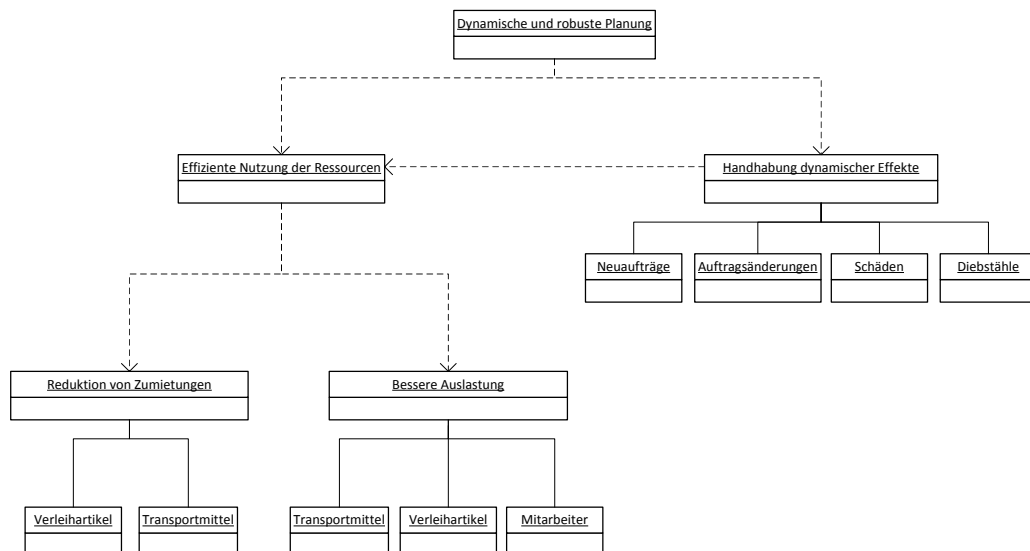


Abbildung 4.6: Globale Ziele des selbststeuernden Dispositionssystems

Berücksichtigung der speziellen Gegebenheiten in der Veranstaltungslogistik. Als untergeordnete Ziele bedingt dies die effiziente Nutzung der vorhandenen Ressourcen bei gleichzeitiger Handhabung dynamischer Effekte. Die effiziente Ressourcennutzung konzentriert sich dabei auf die bessere Auslastung der Verleihartikel, Transportmittel und des Personals und die entsprechende Reduktion von Zumietungen. Die dynamische Handhabung zielt auf die Erhaltung der Planungseffizienz auch bei kurzfristigen Neuaufträgen, Auftragsänderungen oder dynamischen Einflüssen auf die Verfügbarkeit von Ressourcen wie z.B. Diebstahl oder Beschädigungen (vgl. Kapitel 3.2) ab. Als generelle Richtlinie für die Zieldefinition auf globaler und lokaler Ebene gelten die in Kapitel 3.3 definierten Anforderungen an das System.

Den Abschluss der Zieldefinition bildet die Ableitung von Teilzielen und dessen Zuordnung zu logistischen Objekten, sofern bereits möglich. Dieser Zwischenschritt dient als Vorbereitung der für die Strukturdefinition notwendigen Identifikation der relevanten Systemkomponenten. Abbildung 4.7 zeigt beispielhaft die Verbindung zwischen der Reduktion von Zumietungen und den hierfür relevanten Objekten, bzw. Objektklassen Verleihartikel und Transportfahrzeuge.

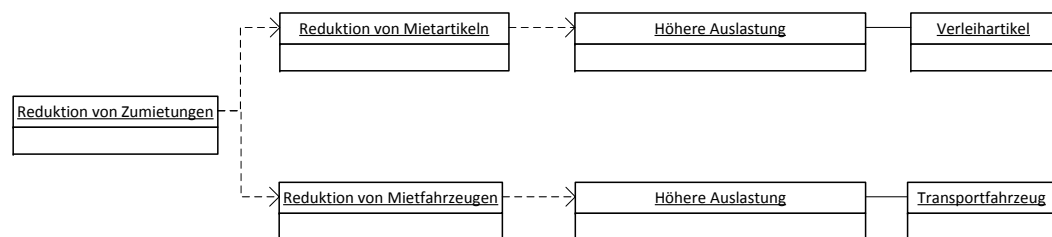


Abbildung 4.7: Zuordnung des Ziels der Zumietungsreduktion zu Verleihartikeln und Transportfahrzeugen

Hierbei bedingt die Reduktion von Zumietungen eine höhere Auslastung der Verleihartikel und Transportmittel im Bestand. Um dies sicherzustellen wird eine möglichst gute Auslastung als Ziel der betroffenen Objekte definiert, so dass diese darum bemüht sind, möglichst oft Verwendung zu finden (Verleihartikel), bzw. eine möglichst gute Auslastung der Transportkapazitäten zu erreichen (Transportfahrzeuge). Eine Übersicht der weiteren Zuordnung von Teilzielen zu Objekten findet sich im Anhang ab Seite 167.

4.3.2 Struktur

Im Folgeschritt werden aus den definierten Zielen die für deren Erfüllung relevanten logistischen Objekte abgeleitet und Aussagen über ihre Interaktion miteinander getroffen, um ein Strukturmodell des zu modellierenden Systems zu erhalten. Dieses erste Grobmodell berücksichtigt die bekannten Rahmenbedingungen des betrachteten Anwendungsfalles der Veranstaltungslogistik und definiert die Grundlage für eine Beschreibung der wesentlichen Systemelemente als autonome Entitäten mit individuellen logistischen Zielen. Es fungiert weiterhin als ein Schema des Zusammenwirkens, der Abhängigkeiten und Wechselwirkungen der logistischen Objekte, bzw. Objektklassen und definiert in deren Gesamtheit das Verhalten des späteren logistischen Systems. Das resultierende strukturelle Grundgerüst ist auf Abbildung 4.8 zu sehen. Es stellt die grundlegende Blaupause für die in den Folgeabschnitten vorgenommenen Detaillierungen auf Objekt-, Prozess- und Systemebene dar.

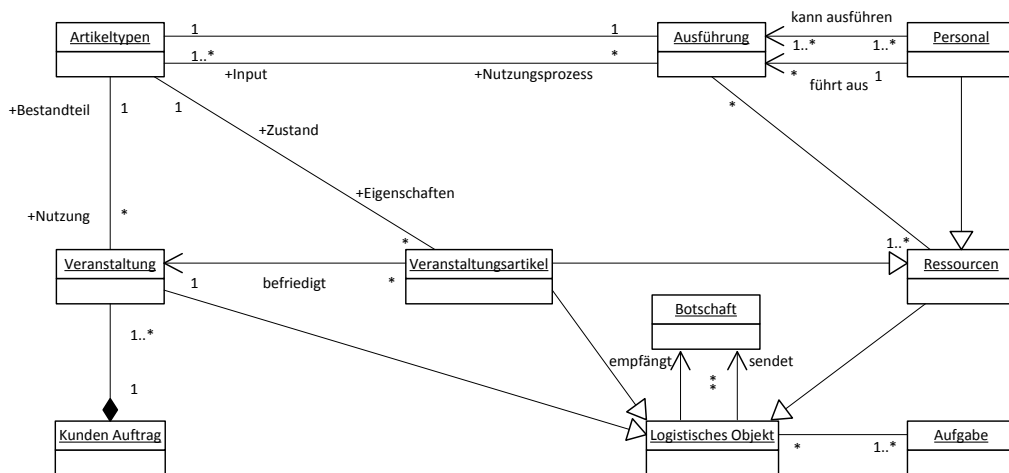


Abbildung 4.8: Strukturdiagramm des selbststeuernden logistischen Systems

Die Strukturbetrachtung fußt auf der auftragsabhängigen Ressourcenallokation unter dynamischen Einflüssen als Kernaufgabe des zu modellierenden Systems. Hier definiert ein Kundenauftrag eine oder mehrere Veranstaltungen, für deren Durchführung Veranstaltungsartikel benötigt werden. Diese liegen in verschiedenen Typen vor und müssen unter Nutzung zusätzlicher Ressourcen wie z.B. Personal oder Transportmittel bereitgestellt werden. Die Bereitstellung der

Veranstaltungsartikel, die Planung und Durchführung der Veranstaltungen sowie der vor- und nachgelagerten Prozesse obliegt dem Personal, welches daher einen besonderen Typus der Klasse Ressourcen darstellt.

Das Strukturmodell besteht entsprechend aus Objekten der Klassen Veranstaltung, Veranstaltungsartikel, Personal und Ressourcen. Hierbei ist die Klasse der Ressourcen als eine Generalisierung der Veranstaltungsartikel und der Personals zu verstehen und enthält weiterhin auch die für die Veranstaltungsdurchführung benötigten Transportmittel. Ferner wird definiert, dass jedes logistische Objekt im System eine oder mehrere Aufgaben besitzt, die in der Prozessdurchführung eine Rolle spielen.

4.3.3 Fähigkeiten

Die Fähigkeiten der einzelnen logistischen Objekte lassen sich direkt aus den jeweiligen Aufgaben ableiten. Die für die individuelle Zielerreichung notwendigen Fähigkeiten setzen sich hierbei aus zwei verschiedenen Arten zusammen. Neben den Fähigkeiten, die direkt für die Zielerreichung notwendig sind, kommen andere Fähigkeiten im Laufe der Verhandlungsprozesse innerhalb des selbststeuernden Systems zum Einsatz. Abbildung 4.9 zeigt beispielhaft die Fähigkeiten eines Verleihartikels.

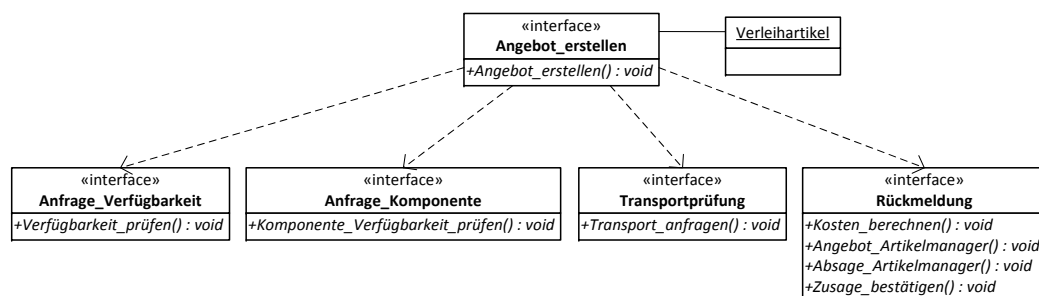


Abbildung 4.9: Fähigkeiten des selbststeuernden Objekts Veranstaltungsartikel

Zielstellung jedes Artikels ist es, möglichst oft im Rahmen von Veranstaltungen eingesetzt zu werden. Um dies zu erreichen, gibt er im Rahmen der selbststeuernden Verhandlungen Angebote an anfragende Veranstaltungen ab, die die Kosten seines Einsatzes beinhalten. Der Prozess der Angebotserstellung beginnt mit der Feststellung der eigenen Verfügbarkeit (Fähigkeit *Verfügbar-*

keit_prüfen()). Nur, wenn der betreffende Artikel weder defekt, noch zur Wartung vorgesehen oder bereits anderweitig gebucht ist, kann eine Zuweisung zur gerade in Planung befindlichen Veranstaltung erfolgen. Weiterhin ist die Verfügbarkeit etwaiger Komponenten (*Komponente_Verfügbarkeit_prüfen()*) jeweils separat zu prüfen sowie der eigene Transport sicherzustellen (*Transport_prüfen()*). So kann beispielsweise eine Bühne nur dann ein Angebot erstellen, wenn alle zugehörigen Komponenten, z.B. Bühnenboden, Träger und Bühnentechnik, verfügbar sind und deren Transport möglich ist.

Ist ein Angebot erstellt (*Kosten_berechnen()*, *Angebot_erstellen()*), erfolgt eine entsprechende Rückmeldung an den für den Artikel verantwortlichen Artikelmanager (*Angebot_Artikelmanager()*). Dieser bildet die Schnittstelle zwischen den angefragten Artikel und der Veranstaltung, die sich auf der Suche nach entsprechender Ausrüstung befindet. Die Veranstaltung kann sich nun für oder gegen den Artikel (und seine Komponenten) entscheiden, was sich in entsprechenden Rückmeldungen niederschlägt. Diese werden vom Artikel bestätigt (*Zusage_bestätigen()*), was den entsprechenden Verhandlungsschritt abschließt. Die Fähigkeit *Absage_Artikelmanager()* kommt zum Einsatz, wenn der Artikel defekt, zur Wartung vorgesehen oder bereits für eine andere Veranstaltung vorgesehen ist.

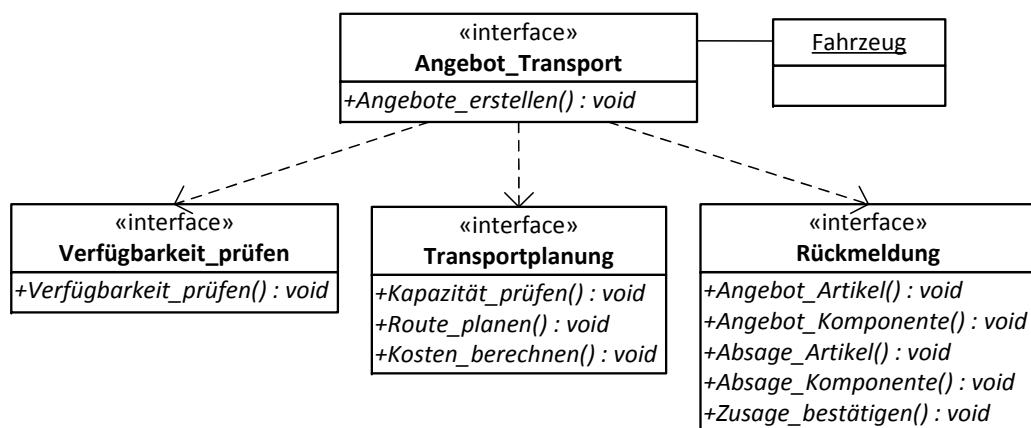


Abbildung 4.10: Fähigkeiten des selbststeuernden Objekts Fahrzeug

Als zweites Beispiel soll das selbststeuernde Objekt Fahrzeug dienen. Dessen Fähigkeiten sind auf Abbildung 4.10 zu sehen. Sie umfassen einige Fähigkeiten, über die auch der Verleihartikel verfügt. Dies betrifft das Beantworten von

Anfragen und das zugehörige Erstellen von Angeboten.

Zur Angebotserstellung hat auch das Transportfahrzeug seine Verfügbarkeit zu prüfen und wenn diese gegeben ist, ein Angebot hinsichtlich der Einsatzkosten zu erstellen. Zusätzlich ist ein Abgleich der Gesamtkapazität sowie der vorliegenden Restkapazität hinsichtlich Volumen und Gewicht mit den Anforderungen des Artikels vorzunehmen. Beide Funktionen sind in der Fähigkeit *Kapazität_prüfen()* zusammengefasst. Ist das Fahrzeug in der Lage, den Artikel oder die Komponente aufzunehmen, wird eine Betrachtung der durch den Transport des Artikels bedingten Veränderungen der bisherigen Fahrzeugroute vorgenommen (*Route_planen()*). Kann eine sinnvolle Route ermittelt werden, erfolgt ein entsprechendes Angebot, sollte dies nicht der Fall sein, wird eine Absage übermittelt (*Angebot_Artikel()*, (*Angebot_Komponente()*, bzw. *Absage_Artikel()*, (*Absage_Komponente()*).

Die Annahme eines Angebotes durch eine Veranstaltung führt zu einer entsprechenden Zuweisung des Artikels, ggf. inkl. der zugehörigen Komponenten. Dies impliziert eine feste Buchung der benötigten Transportkapazitäten und eine feste Anmeldung der korrespondierenden Routen. Die Fähigkeit (*Zusage_bestätigen()*) beendet den zugehörigen Verhandlungsschritt. Alle Folgeverhandlungen werden mit den erzielten Ergebnissen als Vorbedingungen aufgenommen. So verändert eine getroffene Zuweisung die Verfügbarkeit aller beteiligten Objekte sowie zusätzlich die Routenführung und Restkapazität des oder der Transportfahrzeuge. Eine Übersicht über die einzelnen logistischen Objekte und ihre individuellen Fähigkeiten findet sich im Anhang ab Seite 169.

4.3.4 Prozesse

Die im vorangegangenen Modellierungsschritt definierten Fähigkeiten der logistischen Objekte kommen in den logistischen Prozessen des selbststeuernden Systems zur Anwendung und sind dementsprechend Voraussetzung für die logistische Zielerfüllung. Hierbei stellen Prozessdefinitionen in ALEM die Prozesse in der realen Welt nach, überführen diese jedoch von zentral organisierten Strukturen in Schemata wechselseitiger Interaktionen zwischen selbststeuernden logistischen Objekten. Hierbei können die Objekte Teil oder Initiator eines oder mehrere Prozesse sein. Im Folgenden sollen die bereits im vorigen Ab-

schnitt als Beispiele genutzten Objekttypen des Verleihartikels und des Fahrzeuges zur Verdeutlichung der Ableitung von Prozessen aus den Zielen und den Fähigkeiten logistischer Objekte dienen. Ausgangspunkt der Prozessmodellierung ist die Definition von Lebenszyklen für die einzelnen Objektklassen innerhalb des selbststeuernden Systems in Form eines Zustandsdiagramms. Hier sind die Zustände des Objekts sowie die Umstände, die zu Veränderungen bzw. dem Wechsel zwischen Zuständen führen. Abbildung 4.11 zeigt einen solchen Zyklus für einen Verleihartikel.

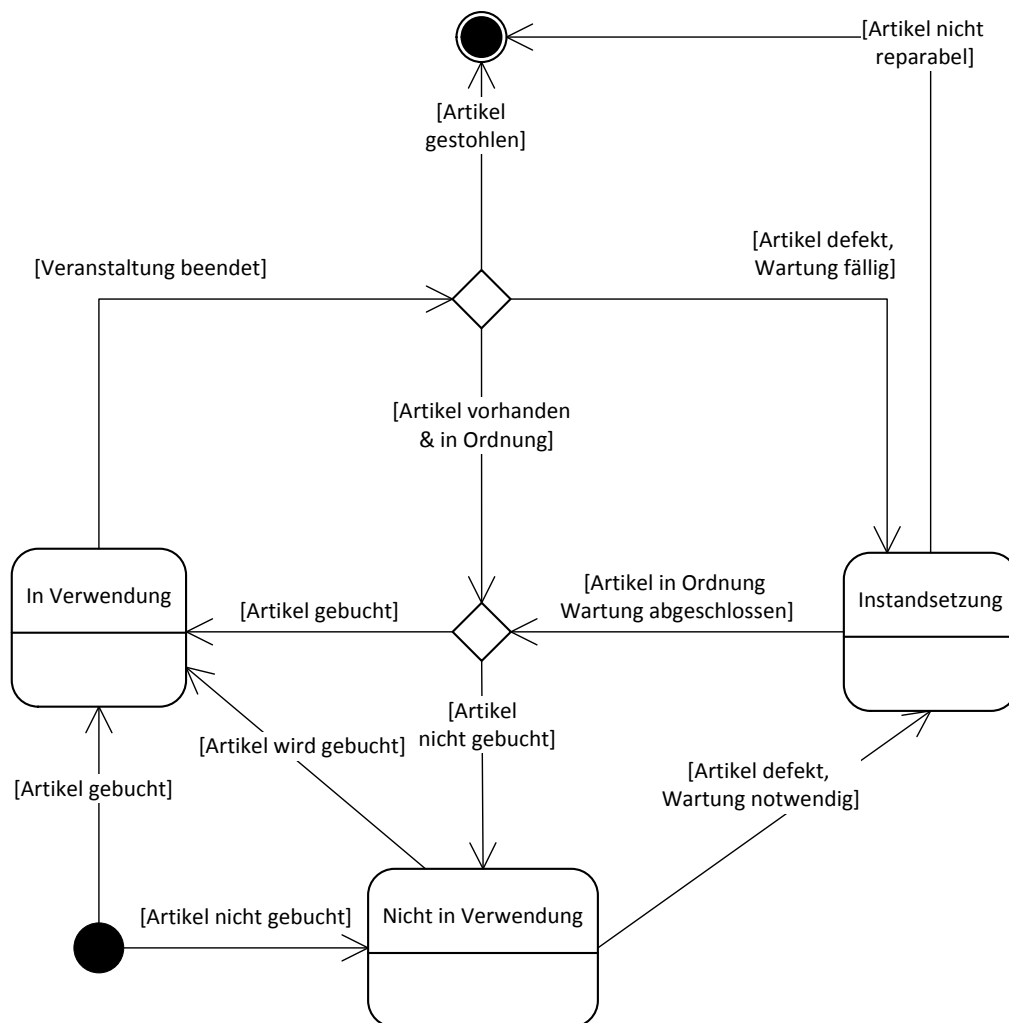


Abbildung 4.11: Lebenszyklus eines Artikels

Bei der Modellierung kann grundsätzlich zwischen dem physischen Lebenszyklus, den ein Objekt in der realen Welt durchläuft und dem "virtuellen" Lebens-

zyklus unterschieden werden. Letzterer definiert die Zustände, die ein Objekt beispielsweise im Rahmen von Planungsprozessen durchläuft, ohne hierbei eine physische Veränderung zu erfahren. Im Fall des Verleihartikels werden auf der obigen Abbildung beide Lebenszyklen zu einem verschmolzen, da sich die Selbststeuerungsaspekte hauptsächlich in den Planungsprozessen wiederfinden und die hier zu treffenden Entscheidungen im Wesentlichen auf den physischen Eigenschaften des Objektes fußen. Weiterhin ist der Transport im Kern als Objektbewegung in der realen Welt zu verstehen, deren Durchführung sich an den lokalen Objekt- und den globalen Systemzielen orientiert.

Ein Verleihartikel kann, je nach Buchungslage, in Verwendung befindlich sein oder nicht. Zwischen den beiden Zuständen *In Verwendung* und *Nicht in Verwendung* kann durch eine Buchung oder das Ende einer Veranstaltung gewechselt werden. Bedingung hierfür ist, dass der Verleihartikel nach Abschluss der Veranstaltung weiterhin einsatzbereit, bzw. noch vorhanden ist. Der (technische) Zustand wird durch eine Beschädigung im Einsatz, während des Transportes oder durch eine planmäßige Wartung beeinflusst. Die Frage nach dem Vorhandensein zielt auf einen möglichen Diebstahl ab, wie er als dynamisches Ereignis bei kleineren und/oder hochpreisigen Artikeln häufiger vorkommt. Liegt ein Diebstahl vor, endet der Lebenszyklus des betreffenden Objekts, ein irreparabler Schaden hat das gleiche Ergebnis. Eine erfolgreiche Reparatur oder Wartung führt den Artikel wieder in den normalen Kreislauf aus Veranstaltungsteilnahme und dem Warten auf diese.

Ergänzend hierzu kann der virtuelle Lebenszyklus eines Verleihartikels ganz oder in Ausschnitten betrachtet werden. Dieser Typ des Lebenszyklus bildet die Zustände des logistischen Objektes Verleihartikel aus Sicht des Planungsprozesses ab. Zwischen den Zuständen wird hier durch die Aktivität des betrachteten Objekts selbst oder durch den Einfluss eines anderen Objektes gewechselt. Abbildung 4.12 zeigt eine entsprechende Zustandsabfolge.

Der Verleihartikel beginnt hier im Status *Keine Anfrage*, der verlassen wird, sobald eine solche eintrifft. Diese wird nun bearbeitet, in dem der Verleihartikel seine Verfügbarkeit prüft und ggf. seinen Transport sicherstellt. Er greift hierbei auf die Fähigkeiten zurück, die im vorangegangenen Modellierungsschritt angelegt wurden (vgl. Abbildung 4.9). Ist der Artikel zu den angefragten Daten verfügbar und ein Transport möglich, so wird ein entsprechendes Angebot

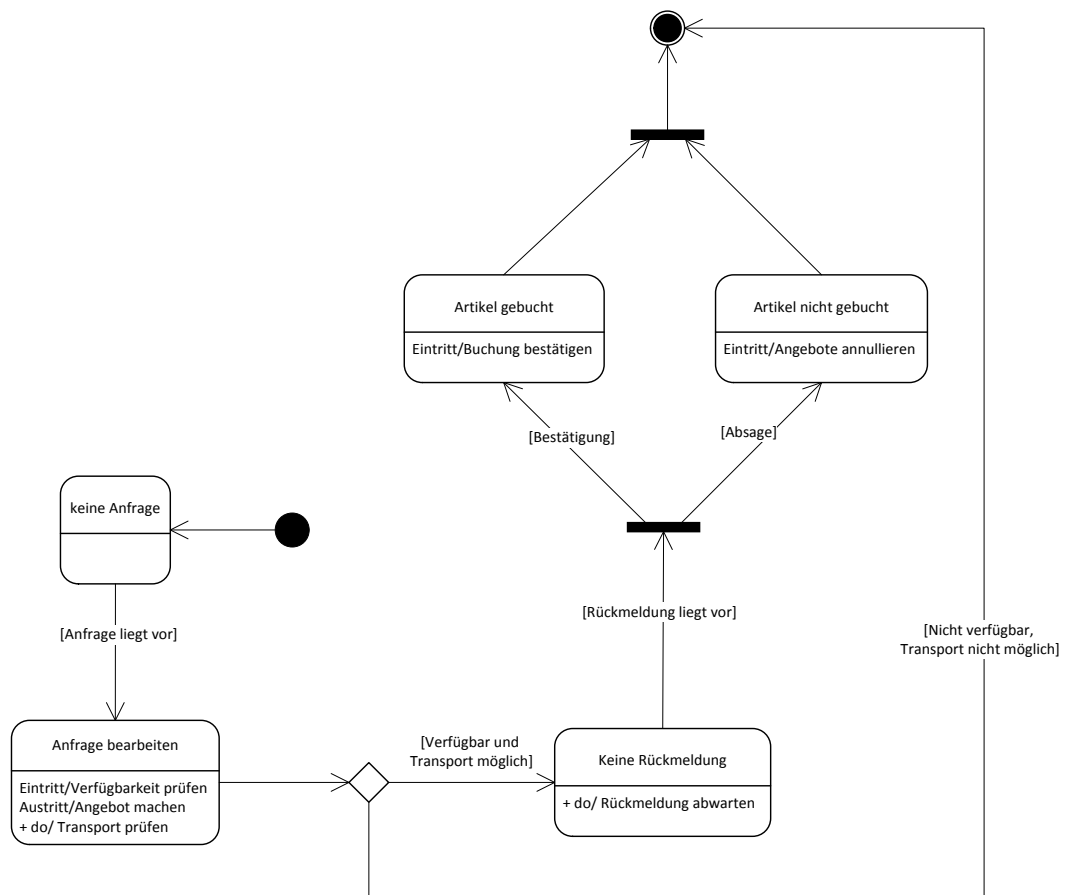


Abbildung 4.12: “Virtueller“ Lebenszyklus eines Artikels

erstellt und an das anfragende Objekt übermittelt. Anschließend erfolgt das Warten auf eine entsprechende Rückmeldung, die entweder als Bestätigung oder Absage eintrifft. Im Anschluss an den Empfang der Rückmeldung ist das Ende des Zyklus erreicht, der alternativer Eintritt in den Endzustand ist durch eine nicht zutreffende Verfügbarkeit oder durch eine Absage des Transports möglich.

Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass der beschriebene “virtuelle“ Zyklus lediglich einen Ausschnitt aus Sicht des Planungsprozesses beschreibt. Es wäre hier möglich, den entsprechenden Teilprozess noch detaillierter zu beschreiben. So würde ein Artikel nach einer Zuweisung wieder in den Anfangszustand *Keine Anfrage* zurückkehren, an der gerade zugewiesenen Veranstaltung teilnehmen,

zu einer bereits vorher zugewiesenen Veranstaltung aufbrechen oder mit einer Wartung, bzw. Reparatur beginnen. In diesem Fall wäre der auf Abbildung 4.12 herausgestellte Ausschnitt in einen übergeordneten Prozess eingebettet, der verschiedene Lebenszyklen von Objekten in selbststeuernden Prozessen miteinander verbindet.

Zur Veranschaulichung soll im Folgenden der Lebenszyklus eines Fahrzeuges dienen. Analog zum Artikel kann dieser mit Fokus auf das reale physische Objekt und aus der Perspektive prozessualer Zusammenhänge betrachtet werden (Abbildung 4.13). Ähnlich wie der Verleihartikel ist ein Fahrzeug entweder in Verwendung, wartet auf diese oder wird Wartungs- oder Reparaturvorgängen unterzogen

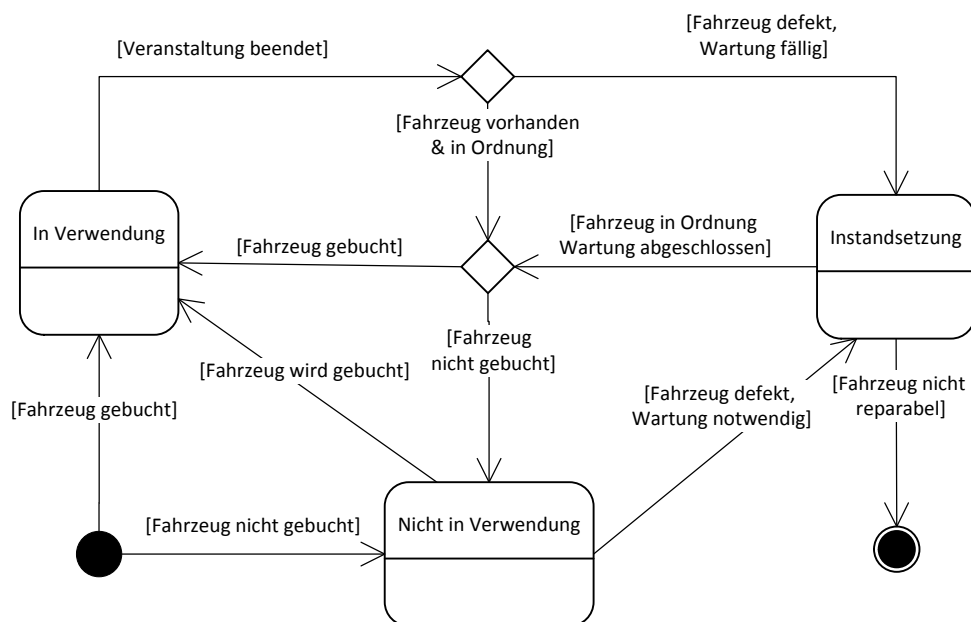


Abbildung 4.13: Lebenszyklus eines Transportmittels

Der physische Lebenszyklus endet, wenn ein Fahrzeug nicht reparabel ist und daher ersetzt wird. An dieser Stelle sind zwei weitere Optionen denkbar, die zum Abschluss des Zyklus führen könnten. Dies wäre ein Diebstahl (analog zum Artikel) oder das Ausmustern des Fahrzeugs im Zuge einer Erneuerung des Fuhrparks. Da der Diebstahl deutlich weniger wahrscheinlich ist, als bei einem Verleihartikel, wird auf die Modellierung dieser Option im Lebenszyklus verzichtet, was auch den Erfahrungen des Beispielunternehmens entspricht.

Ähnlich verhält es sich mit der Ausmusterung eines Fahrzeuges, dies tritt im Regelfall nur im Abstand einiger Jahre auf, weshalb dieses Detail für die Modellierung des selbststeuernden Dispositionssystems nicht betrachtet wird. Hier kann man von der Annahme ausgehen, dass die Disposition, unter Berücksichtigung dynamischer Ausfälle, nur auf Basis vorhandener Ressourcen durchgeführt wird. Fahrzeuge, die den Fuhrpark absehbar verlassen, werden entsprechend nicht berücksichtigt oder hinsichtlich ihrer Verfügbarkeit beschränkt. Eine ähnliche Vorgehensweise kann auch auf Artikel und ihre Komponenten übertragen werden, sollte ein Austausch in Folge einer Erneuerung der Ressourcen anstehen. Der virtuelle Lebenszyklus eines Fahrzeuges (Abbildung 4.14) gleicht aus prozessualer Sicht dem eines Verleihartikels. D.h. das selbststeuernde Objekt Fahrzeug bearbeitet und beantwortet planungsrelevante Anfragen hinsichtlich seiner Nutzung.

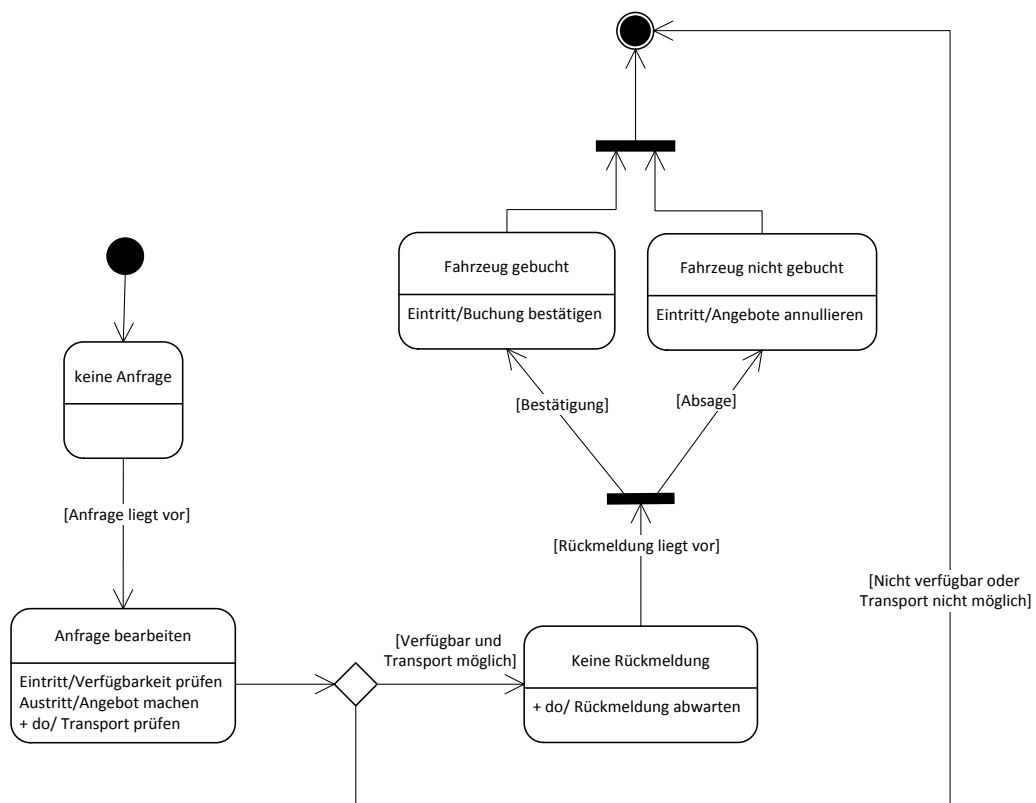


Abbildung 4.14: “Virtueller“ Lebenszyklus eines Transportmittels

Der Anknüpfungspunkt zum Verleihartikel ist nun dadurch gegeben, dass dieser Anfragen hinsichtlich eines möglichen Transportes zu oder von einer Veranstaltung an das Fahrzeug richtet, auf diese wartet und nach dem Empfang entsprechend weiterverarbeitet.

Die Lebenszyklen der Objekte innerhalb der Planungsprozesse sind also miteinander verknüpft und beeinflussen sich wechselseitig durch ihren Input. Hierbei sind beide in den übergeordneten Prozess der Veranstaltungsplanung eingebunden, der die Zyklen von Fahrzeugen, Verleihartikeln und anderen Objekten im System koordiniert miteinander verbindet und ihre Wechselwirkung strukturiert. Entsprechend kann der übergeordnete Prozess als Verknüpfung der Lebenszyklen der an ihm beteiligten Objekte aufgefasst werden und nimmt seinen Verlauf durch die Anwendung der Fähigkeiten dieser Objekte. Der auf Abbildung 4.15 dargestellte Prozess der Artikelauswahl für eine Veranstaltung zeigt die Verknüpfung der oben eingeführten Lebens- und Prozesszyklen für Verleihartikel und Fahrzeug.

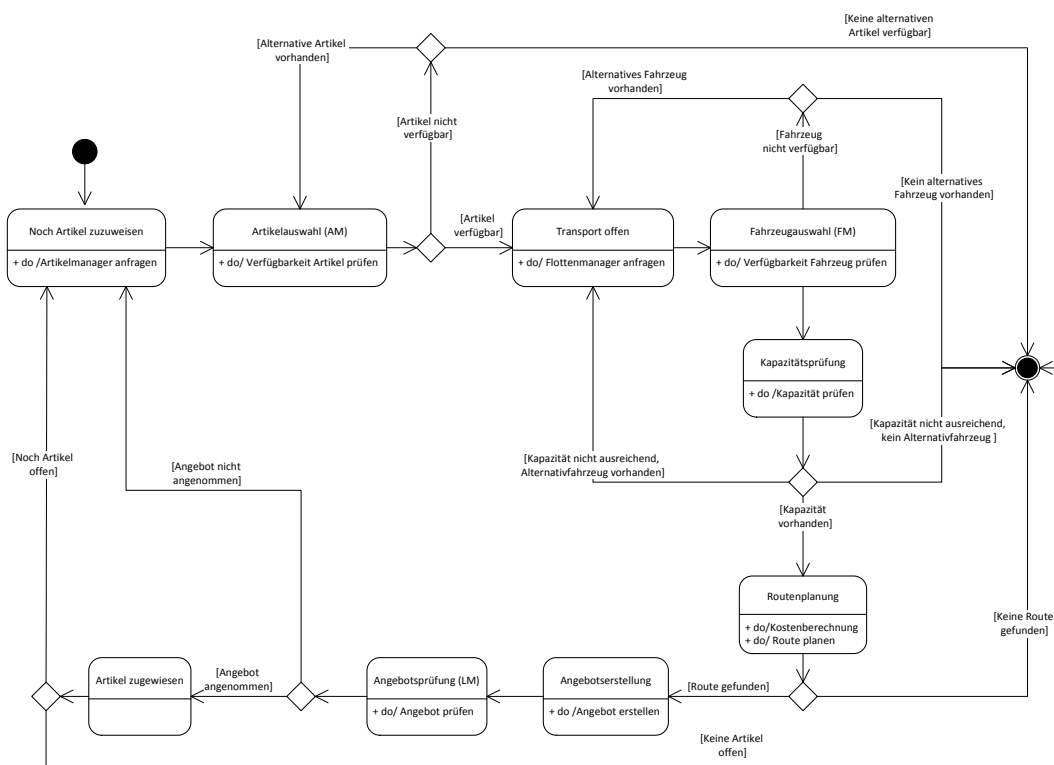


Abbildung 4.15: Prozess der Artikelauswahl für eine Veranstaltung

Der Prozess wird angestoßen und iterativ durchgeführt, solange aus einer in der vorangegangenen Grobplanung einer Veranstaltung eingeplante Artikelfamilie noch kein konkretes Gerät ausgewählt und zugewiesen wurde. Die vorher in den Einzelprozessen dargestellten Verfügbarkeitsprüfungen und Routen werden nun in direkter Folge und in Abhängigkeit voneinander durchgeführt.

Solange noch Verleihartikel offen sind, werden Anfragen an die Artikel der in der Grobplanung vorgesehenen Artikelfamilien gesendet. Die betreffenden Artikel prüfen ihre Verfügbarkeit und die potentieller Komponenten. Sollte ein Einsatz auf der anfragenden Veranstaltung aus terminlicher und technischer Sicht möglich sein, wird eine Prüfung der Transportoptionen angestoßen. Diese wird von den Transportfahrzeugen des Fuhrparks auf Basis bereits bestehender Termine, zugehöriger Routen und verfügbarer Transportkapazitäten beantwortet. Ergebnis des Prozesses sind Angebote, die die jeweiligen Kosten des Einsatzes, basierend auf den Transportkosten für den Artikel beinhalten. Zugewiesen wird der Artikel, der das günstigste Angebot machen kann. Sollte kein Artikel oder keine Transportkapazität verfügbar sein, kann der Projektplaner die Grobplanung anpassen (vergleichbare Artikelfamilie auswählen) und/oder die Zumietung von Fremdartikeln und -fahrzeugen gestatten (vgl. Sollprozess ab Seite 45). Eine Gesamtübersicht der in diesem Modellierungsschritt definierten Lebenszyklen und Prozesse ist im Anhang ab Seite 172 zu sehen.

4.3.5 Entscheidungen

Die im Rahmen des selbststeuernden Dispositionsprozesses zu treffenden Entscheidungen konzentrieren sich im Wesentlichen auf die Verfügbarkeit der Verleihartikel und die damit verknüpfte Frage nach ihrem Transport von, zu und zwischen den Veranstaltungsorten. Weitere Planungsfragen finden außerhalb des Systems statt, beispielsweise wird die grundsätzliche Eignung einer Artikelfamilie und die Anzahl der gewünschten Artikel bereits in der Grobplanung festgelegt und zu Beginn der selbststeuernden Detailplanung als gegeben angesehen. Auch die Entscheidung über den Einsatz von Mietfahrzeugen oder -artikeln wird außerhalb des zu modellierenden Systems vom zuständigen Projektplaner getroffen. Diese Entscheidungen werden im Folgenden nicht betrachtet und finden keinen Eingang in die Modellierung.

Die maßgeblichen Entscheidungen hinsichtlich Artikelzuordnung und Trans-

portorganisation wurden in den vorangegangenen Schritten des Modellierungsprozesses bereits insofern betrachtet, als dass sie die modellierten logistischen Prozesse anstoßen, ihren Verlauf beeinflussen und sich in den Lebenszyklen der handelnden logistischen Objekte wiederfinden. So entscheidet ein Verleihartikel über seine Verfügbarkeit, ein Fahrzeug über die Sinnhaftigkeit einer möglichen Route und ein ListManager über das beste Angebot, dass er aus einem Pool von Verleihartikeln erhalten hat. Hierbei folgen die handelnden Objekte Entscheidungsregeln, um die für die Erreichung der individuellen Ziele beste Handlungsalternative auszuwählen. Die zu berücksichtigenden Entscheidungselemente sind auf Abbildung 4.16 aufgeführt [9, 73].

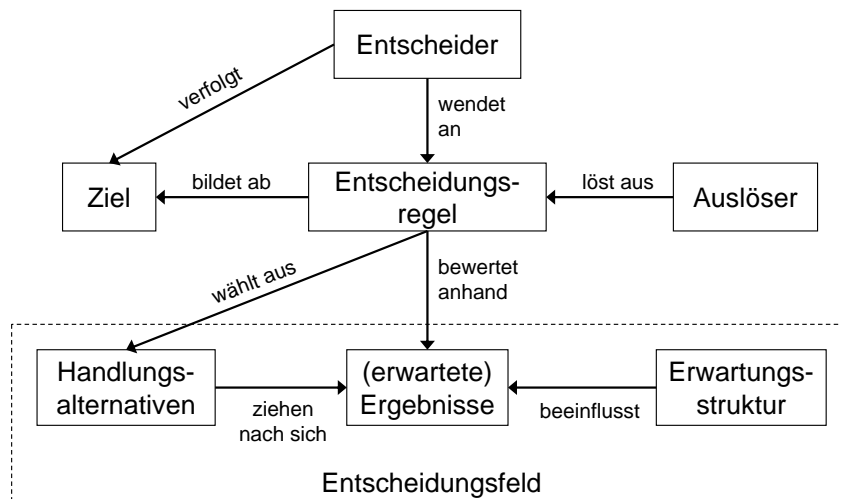


Abbildung 4.16: Elemente einer Entscheidung nach [9] und [73]

Die Definition der Ziele und die Ausgestaltung der Entscheidungsregeln, die zu ihrer Erreichung führen sollten, haben direkte Auswirkungen auf die Zielfunktionen der selbststeuernden Objekte. Im Folgenden soll kurz die Entscheidungsfindung eines Fahrzeuges hinsichtlich seiner Route zur Anschauung dienen, auf die Entwicklung und Implementierung der Zielfunktionen wird detaillierter in Kapitel 4.4 eingegangen. In Anlehnung an die in Abschnitt 4.3.1 definierten globalen und lokalen Ziele des selbststeuernden Dispositionssystems ist ein Transportfahrzeug darauf aus, seine Kapazitätsauslastung zu maximieren und dabei bei möglichst häufigem Einsatz so wenig Kilometer zurückzulegen, wie möglich.

Im vorangegangenen Kapitel wurde der Prozess der Fahrzeugauswahl bereits betrachtet, maßgebliche Entscheidung des Prozesses ist die Frage, ob ein Fahrzeug einen anfragenden Artikel oder eine Komponente transportieren kann (Kapazität) und ob dies sinnvoll ist (Routen- und Tourenplanung). In Anlehnung an Abbildung 4.16 ist das Fahrzeug hier als Entscheider zu sehen, der die Ziele der Kapazitätsmaximierung bei gleichzeitiger Minimierung der gefahrenen Kilometer verfolgt. Ausgelöst durch die Anfrage eines Artikels hat nun die Entscheidung zu fallen, ob ein Transport stattfinden kann oder nicht (Abbildung 4.17).

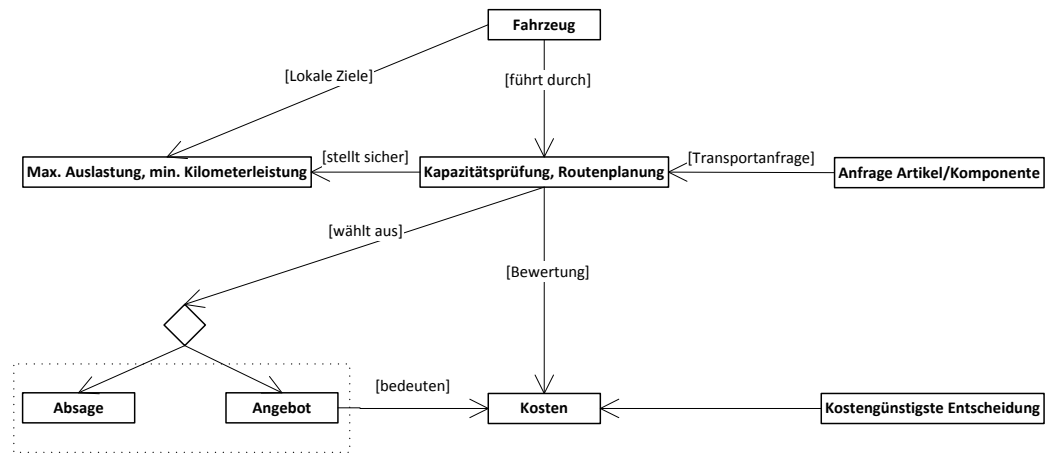


Abbildung 4.17: Entscheidung des logistischen Objekts Fahrzeug

Das Fahrzeug führt entsprechend der Prozessdefinition eine Prüfung der eigenen Verfügbarkeit, der freien Restkapazität und möglicher Routen durch. Die nun entstehenden Handlungsalternativen umfassen eine direkte Absage oder ein Angebot, dass eine Route und die damit verbundenen Kosten enthält. Hierbei wird eine Absage erteilt, wenn die Verfügbarkeit oder notwendige Transportkapazität nicht gegeben ist, ein Angebot kommt zustande, wenn es mind. eine mögliche Route gibt, um das anfragende Objekt zur gewünschten Zeit an den Zielort zu bringen. Existieren mehrere mögliche Routen, werden die Kosten als Auswahlkriterium herangezogen und nur die Günstigste wird als Angebot weitergeleitet. Die Kostenfunktion ist entsprechend so ausgerichtet, dass eine geringere Fahrdistanz auch zu geringeren Kosten führt. Diese Regel wird durch den Wunsch nach Kapazitätsmaximierung insofern eingeschränkt, als das unter Effizienzgesichtspunkten ein längerer Transportweg über mehre-

re Routenpunkte bei hoher Auslastung des Fahrzeugs einem kurzen Transport mit geringer Auslastung vorzuziehen ist.

4.3.6 Wissen

Die Entscheidungen der selbststeuernden Objekte beruhen auf Wissen, das sie entweder als eigene Attribute besitzen oder durch Kommunikation untereinander erwerben. Um die in den Prozessdiagrammen modellierten Prozessabläufe und in ihrem Verlauf zu treffenden Entscheidungen zu ermöglichen, müssen die in der Struktursicht bereits definierten Klassen weiter ausgearbeitet werden. Das Ergebnis dieses Schrittes sind die Wissensklassen des selbststeuernden logistischen Systems, bestehend aus den physischen und immateriellen Objekten und dem ihnen als Attribute zugehörigen Wissen (Abbildung 4.18).

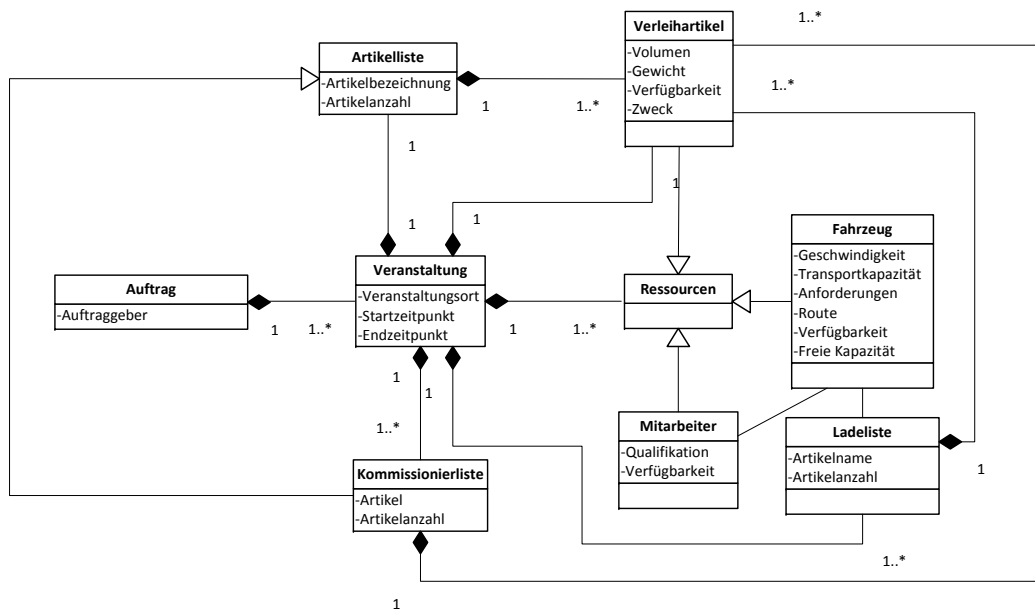


Abbildung 4.18: Wissensklassen des selbststeuernden Dispositionssystems

Im gewählten Anwendungsfall der Veranstaltungslogistik stellt die Veranstaltung das zentrale Element dar. Eine Veranstaltung ist einem Auftrag zugeordnet und verfügt als Attribute über das inhärente Wissen des Veranstaltungsortes, des Start- sowie des Endzeitpunktes. Jeder Veranstaltung ist wiederum eine Artikelliste zugeordnet, die das Ergebnis der Grobplanung und die Grundlage

der Detaildisposition darstellt. Die für die Durchführung notwendigen Verleihartikel sind sowohl Teil einer Artikelliste, als auch der übergeordneten Veranstaltung. Sie verfügen über die Attribute Volumen, Gewicht, Verfügbarkeit und Zweck. Weiterhin sind die Verleihartikel Teil einer veranstaltungsspezifischen Kommissionier- und einer oder mehrerer Ladelisten, die jeweils das Wissen über die Namen, bzw. Typen und die Anzahl der ihnen zugeordneten Artikel haben. Die Ladelisten gehören schließlich zu je einem Fahrzeug, das eine spezifische Geschwindigkeit und Transportkapazität besitzt, bestimmte Anforderungen an den Fahrer stellt und in Abhängigkeit von einer eventuell bereits zugewiesenen Route über eine generelle Verfügbarkeit und eine freie Restkapazität verfügt. Die letzte Wissensklasse betrachtet die Mitarbeiter, speziell die Fahrer, die über eine Verfügbarkeit für den Einsatz sowie über individuelle Qualifikation, beispielsweise eine bestimmte Fahrerlaubnis, verfügen. Eine Übersicht des vorhandenen Wissens und seiner Verteilung ist einer Wissenslandkarte (engl. Knowledge Map) im Anhang auf Seite 179 zu entnehmen.

4.3.7 Kommunikation

Das den Objekten zugehörige Wissen wird innerhalb der in den vorigen Kapitel modellierten Prozesse zur Anwendung gebracht, um Entscheidungen zu treffen und somit entsprechenden Einfluss auf den Prozessablauf zu nehmen. Der Austausch des Wissens im Rahmen der Prozessausführung definiert den Hauptanteil der Kommunikation, die im Rahmen der Verhandlungen zwischen den selbststeuernden Objekten stattfindet und stellt eine bedeutende Verknüpfung zwischen den Einzelprozessen dar. Die Modellierung der einzelnen Nachrichten und die Strukturierung ihres prozessinternen und prozessübergreifenden Austausches sind Teil des nächsten Modellierungsschrittes.

Die Art, Inhalt und Abfolge des Nachrichtenaustausches erschließt sich aus der Reihenfolge der Prozesse und ihrer Abhängigkeit untereinander. Weiterhin kann aus den bereits definierten Prozessen abgeleitet werden, welche Informationen Teil welcher Nachrichten sind und zwischen welchen Adressaten sie ausgetauscht werden. Bei der Modellierung des Nachrichtenaustausches steht neben den prozessualen Notwendigkeiten auch die spätere Simulation im Fokus. In der vorliegenden Arbeit soll das modellierte System in ein Szenario über-

führt und durch das Werkzeug PlaSMA in Form einer Multiagentensimulation simuliert werden. Entsprechend ist bei der Modellierung der Kommunikation auf die spätere Simulationsfähigkeit der Prozesse zu achten.

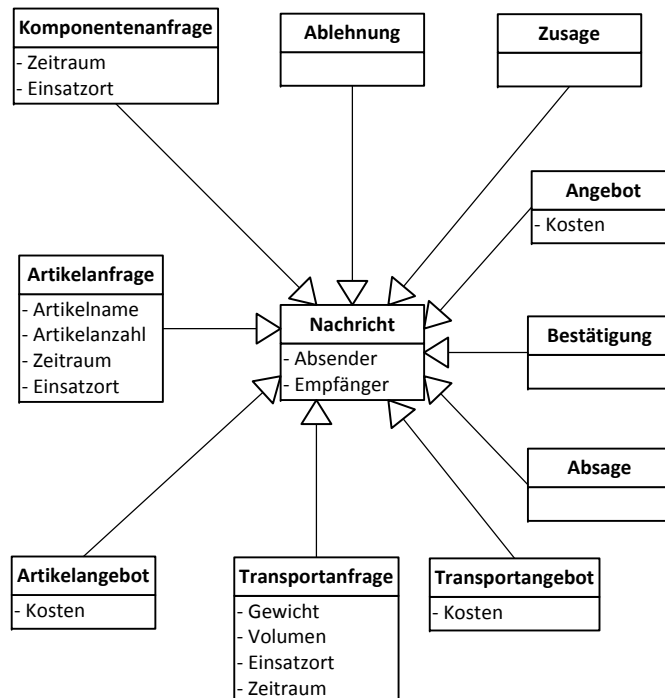


Abbildung 4.19: Nachrichtenklassen des selbststeuernden Dispositionssystems

Als Ausgangspunkt des Modellierungsprozesses dient eine Definition der verschiedenen Klassen von Nachrichten sowie ihrer Inhalte (Abbildung 4.19). Hierbei stehen alle Arten von Nachrichten in einer Vererbungsbeziehung zu einer Basisklasse, die als minimale Attribute jeder Nachricht den Absender und Empfänger festlegt.

Aufbauend auf dieser Grunddefinition sind nun alle Nachrichten zu definieren, die innerhalb und zwischen den Prozessen erzeugt, ausgetauscht und verarbeitet werden. Dies sind z.B. die Anfragen an Artikel und Komponenten hinsichtlich ihrer Verfügbarkeit oder die Transportanfragen an die Fahrzeuge. Diese Nachrichten enthalten zusätzliche, prozessrelevante Informationen, wie den Einsatzort, den Zeitraum der Veranstaltung oder Anzahl und Name der geforderten Artikel. Die Bearbeitung der Anfragen im Rahmen der Planung von Transportzusammensetzung und möglicher Routen generiert weitere

Nachrichten in Form von Absagen, Angeboten oder Zusagen. Diese enthalten Informationen, die zu Entscheidungen herangezogen werden, wie z.B. Kosten oder Zuweisungen, die das Ende eines Verhandlungsschrittes markieren. Zusammengefasst bilden die Nachrichtenklassen das Kommunikationsportfolio, aus dem sich die selbststeuernden Objekte aufgabenspezifisch bedienen.

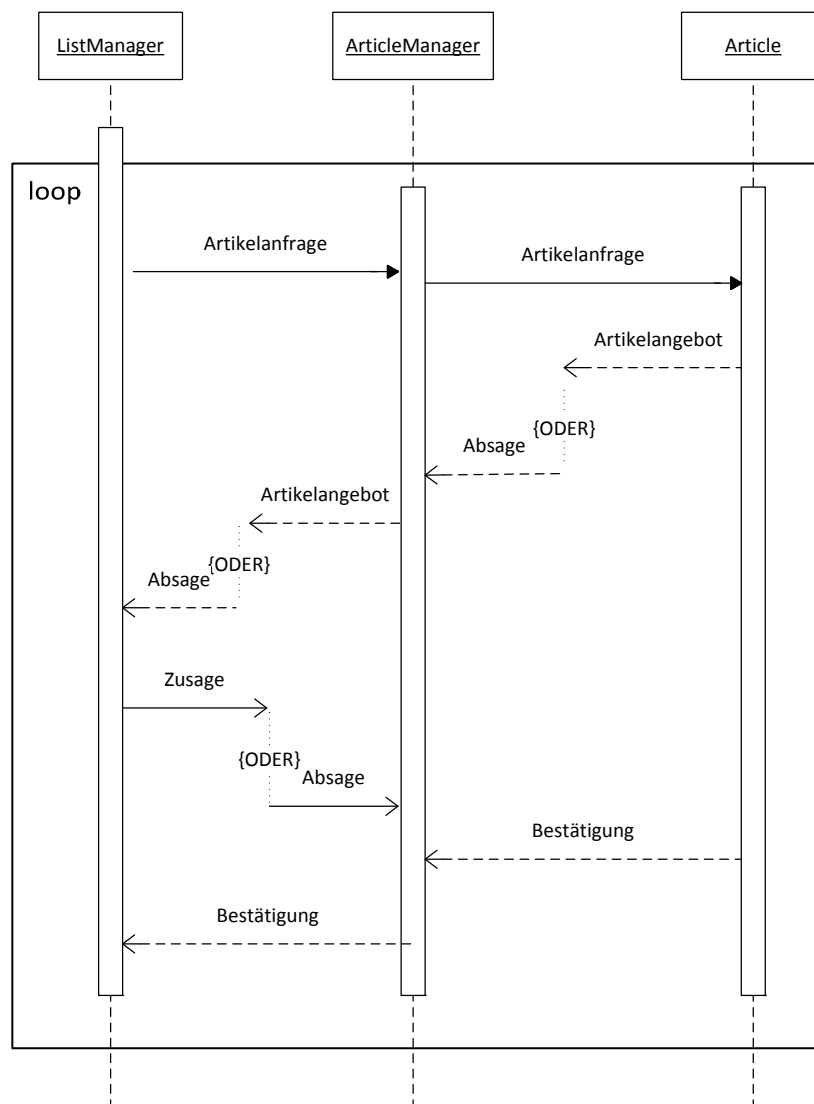


Abbildung 4.20: Nachrichtenaustausch eines Objektes aus der Klasse Artikel

Die einzelnen Kommunikationssequenzen bilden nun Abfolgen aus dem verfügbaren Pool der Nachrichten, wobei die Reihenfolge, die Nachrichtenart und die jeweiligen Adressaten und Empfänger von dem Prozess abhängen, in dessen

Verlauf die Kommunikation stattfindet. Abbildung 4.20 zeigt die Kommunikation eines logistischen Objektes aus der Klasse Artikel für den Fall, dass der betreffende Artikel keine Komponenten besitzt. Die Kommunikation zwischen Artikel und Komponenten sowie die Kommunikationssequenzen zwischen den anderen selbststeuernden Objekten des Dispositionssystems sind aus Platzgründen im Anhang ab Seite 180 zu finden.

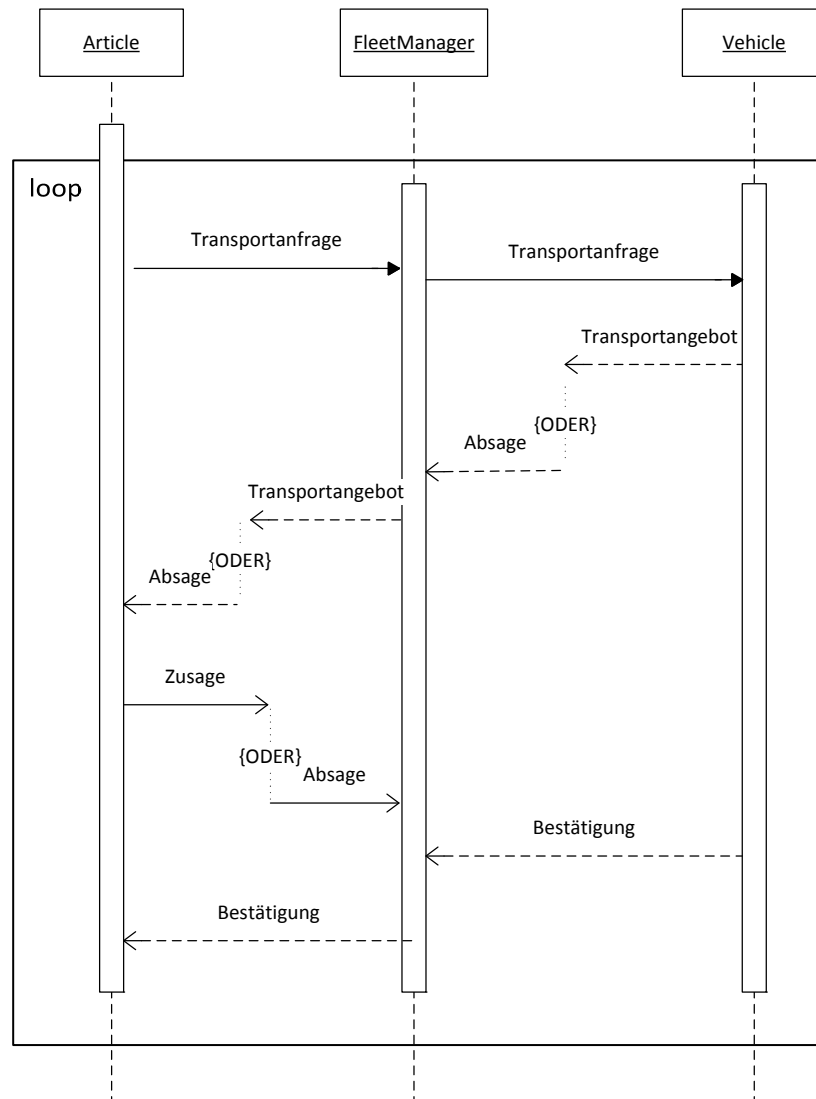


Abbildung 4.21: Nachrichtenaustausch der Klasse Fahrzeuge

Ein Verleihartikel kommuniziert mit dem für die entsprechende Artikelfamilie zuständigen Articlemanager und unterbreitet diesem Angebote oder Absagen,

die dieser an den oder die Listmanager weiterreicht. Die Angebote kommen über Transportanfragen zustande, die der Verleihartikel über Anfragen an den Flottenmanager bekommt (vgl. Abbildung 4.21). Wird eines der Angebote von einem Listmanager akzeptiert, werden entsprechende Zusagen ausgetauscht. Die Kommunikation endet in diesem Fall mit einer entsprechenden Bestätigung. Letztere stellt sicher, dass ein gemachtes Angebot Bestand hat, d.h. der Transport weiterhin zu den angesetzten Kosten durchführbar ist. Dieser Bestätigungsschritt ist notwendig, da in der Regel mehrere Veranstaltungen zu planen sind, die wiederum diverse Artikel und entsprechende Transportkapazitäten benötigen. Durch die parallele Verhandlungsführung können getroffene Zusagen zu Kostenverschiebungen führen, da beispielsweise eine Route nicht mehr möglich ist oder höhere Kosten verursachen würde. In solchen Fällen kann eine Zusage zurückgezogen werden, was zu einer Absage der angemeldeten Route und zu neuen Verhandlungen führt.

Wie die Prozesse zur Auswahl eines Verleihartikels aus einer Artikelfamilie und zur Bestimmung eines konkreten Fahrzeuges für den Transport, ähneln sich die Nachrichtensequenzen der einzelnen logistischen Objekte im Verlauf der Verhandlungen. Analog zu den Darstellungen der einzelnen Sequenzen zwischen Repräsentanten physischer Objekte, ist auch die Kommunikation zwischen den koordinativen Agenten für Listen (Veranstaltungen), Artikel (Artikelfamilien), Komponenten und Fahrzeugflotte recht ähnlich strukturiert. Abbildung 4.22 zeigt eine vereinfachte Übersicht der Kommunikation zwischen und über diese Objekt-/Agentenklassen.

Wie schon in den vorangegangenen Abschnitten ausgeführt, dienen die koordinativen Agenten zur Strukturierung und Vereinfachung der Verhandlungen innerhalb der PlaSMA-Simulation. Entsprechend wird bei der Erzeugung und Bearbeitung der Anfragen sowie der zugehörigen Zu- und Absagen in die untergeordneten Verhandlungen verzweigt. Beispielsweise wird die Anfrage der Artikelmanager intern in der jeweiligen Artikelfamilie weitergeleitet. Die angefragten Verleihartikel kommunizieren nun mit den Manageragenten nachgeordneter Komponenten oder versenden über den Flottenmanager Transportanfragen an die Fahrzeuge.

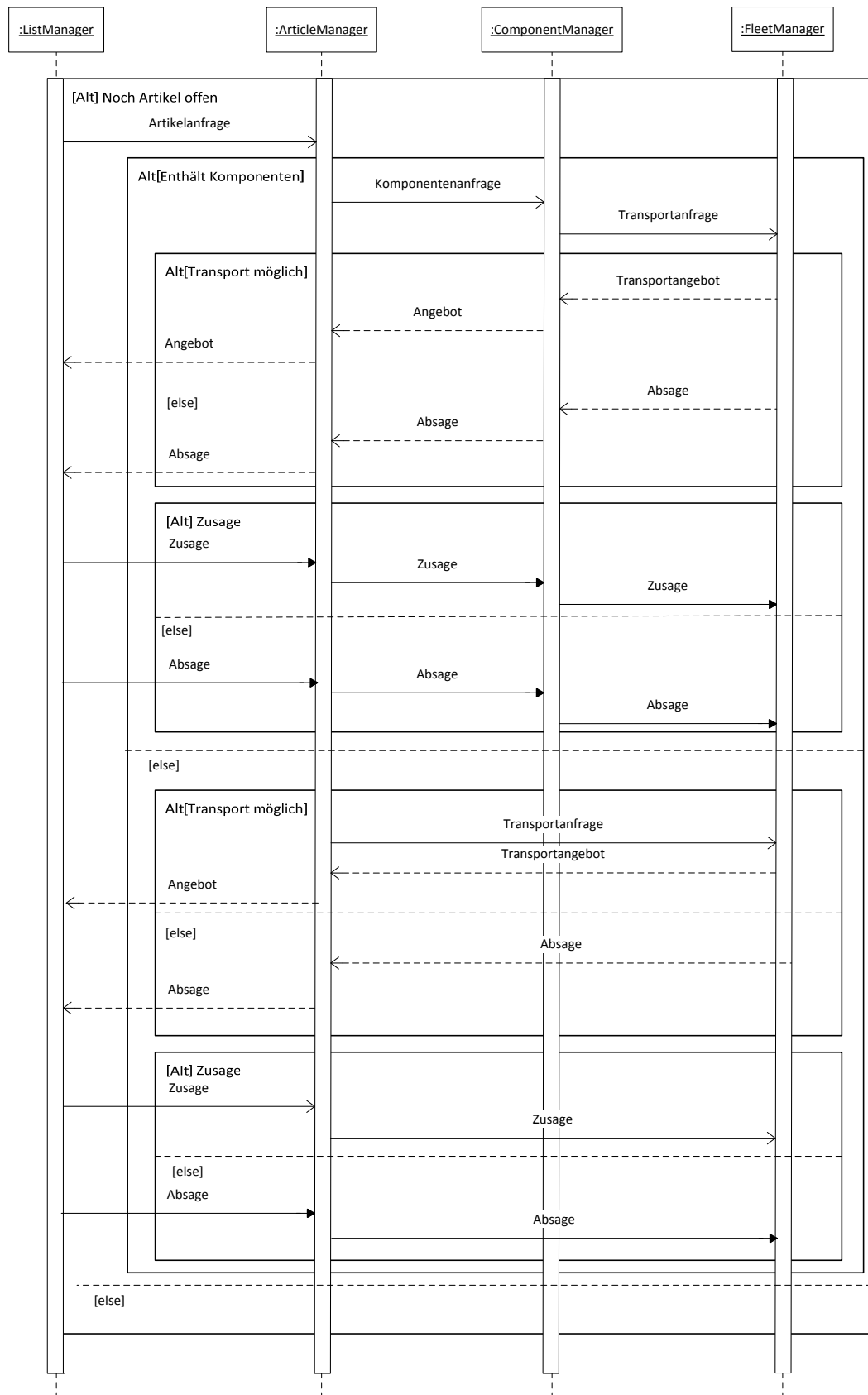


Abbildung 4.22: Nachrichtensequenzen zwischen den koordinativen Agenten

Rückmeldungen nehmen einen entsprechenden Verlauf in entgegengesetzter Richtung. Die Verhandlungsrichtung verläuft also abwechselnd in Form von Anfragen von den übergeordneten Listenagenten die Hierarchie hinab bis zu den Fahrzeugen (Top-Down) und in Form von Rückmeldungen die Hierarchie wieder hinauf (Bottom-up). Die Verzweigungstiefe im Hierarchiebaum hängt hierbei von der Verfügbarkeit der Verleihartikel, ihrer Komponenten und der Fahrzeuge ab. Ist ein Artikel nicht verfügbar, so endet eine Anfrage bereits an dieser Stelle. Die kürzeste Anfrage durchläuft also die drei Hierarchien ListManager, ArticleManager und Verleihartikel. Die längste Anfrage wird über sieben Ebenen weitergegeben; ListManager, ArticleManager, Verleihartikel, ComponentManager, Komponente, FleetManager, Fahrzeug.

Die zugehörigen Nachrichtensequenzen reichen also von vier für den ersten Fall einer Anfrage über drei Hierarchiestufen mit entsprechender Rückmeldung bis hin zu 36 Nachrichten. Dieser Fall umfasst die Zuweisung eines Artikels mit mindestens zwei Komponenten, welche einzeln angefragt werden und individuell mit den Fahrzeugen in Kontakt treten. Es entstehen zehn Anfragen in Top-Down Richtung: ListManager, ArticleManager, Verleihartikel; 2x ComponentManager, 2x Komponente 2x FleetManager und 1x Fahrzeug. Diese erzeugen neun Angebote (Bottom-Up) und eine entsprechenden Anzahl Zusagen (Top-Down) sowie finale Bestätigungen (Bottom-up).

Eine Verhandlung über die maximale Hierarchietiefe erzeugt jedoch in der Regel mehr Nachrichten, da in dem Minimalbeispiel von nur zwei Komponenten ausgegangen wird und gleich das erste Fahrzeug die Zusage für den Transport beider Komponenten gibt. Weiterhin werden die Absagen/Angebote der nicht berücksichtigten Fahrzeuge in der Rechnung ausgeklammert, um das Verständnis zu vereinfachen.

4.3.8 Szenario

Bei der Abbildung des in ALEM modellierten selbststeuernden Dispositionssystems als szenariobasierte Simulation in PlaSMA werden die in den vorangegangenen Modellierungsschritten festgelegten Teilaspekte des Systems unter Nutzung der PlaSMA zugrundeliegenden Ontologien zu einem simulationsfähigen Szenario zusammengefasst. In Anlehnung an den Soll-Prozess der selbststeuernden Disposition existiert nicht nur ein generelles Planungsszena-

rio, sondern eine iterative, dynamische Planung. Daher sind die in PlaSMA simulierten Szenarien jeweils als Momentaufnahmen der Auftragsituation und des entsprechenden Planungsstandes unter Berücksichtigung möglicher dynamischer Ereignisse zu verstehen. Die Simulationsszenarien umfassen jeweils den Bestand an Aufträgen und deren Eigenschaften sowie Zustand, Anzahl und Position der zu disponierenden Ressourcen. Dies sind die Transportmittel der Fahrzeugflotte sowie der Bestand an Veranstaltungsartikeln, der zum betreffenden Zeitpunkt im Zentrallager und an den Veranstaltungsorten zur Verfügung steht.

4.4 Simulation mit PlaSMA

Das Prinzip der wiederholten Simulation mit PlaSMA folgt dem einer rollierenden Planung (Abbildung 4.23). Hierbei erzeugt jeder Simulationslauf die Disposition zu einer bestimmten Auftragsituation mit den jeweils verfügbaren Ressourcen. Auftragsänderungen oder veränderte Verfügbarkeiten der Ressourcen werden durch Modifikation des Szenarios und erneute Simulation berücksichtigt, was als Planrevision unter den veränderten Bedingungen verstanden werden kann.

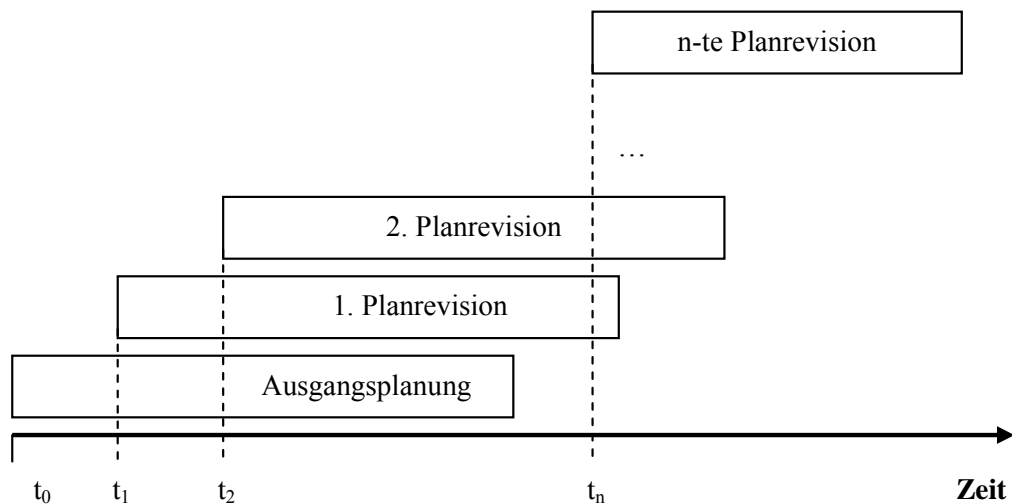


Abbildung 4.23: Prinzip der rollierenden Neuplanung, angelehnt an [37]

Die folgenden Unterkapitel beschreiben die Erstellung und Simulation der PlaSMA-Szenarien im Detail, beginnend mit der Überführung der in ALEM modellierten Konzepte des selbststeuernden Dispositionssystems. Weiterhin wird auf die Datengrundlage der Szenarien, Aufbau und Ablauf der Simulation und die Ausgabe der Planungsergebnisse eingegangen. Den Abschluss bildet die Anpassung der autonomen Routenplanung mittels des DLRP auf die Veranstaltungslogistik und die Realisierung dieser Anpassung als Agentenverhalten in PlaSMA.

4.4.1 Szenariogenerierung

Ein Szenario in PlaSMA besteht in der Regel aus drei Komponenten; dem Weltmodell, den Klassendefinitionen der Softwareagenten und einem Set zusätzlicher szenariospezifischer Einstellungen. Das Weltmodell enthält hierbei die Infrastruktur des Szenarios, bestehend aus dem zugrundeliegenden (logistischen) Netzwerk sowie den vorhandenen Objekten und Agenten. Die Beschreibung der Struktur des Weltmodells wird in der Beschreibungssprache Web Ontology Language (OWL) vorgenommen und kann mehrere Dateien umfassen [83, 103]. Diese enthalten einen Graphen aus Knoten und Kanten als Infrastrukturmodell und die Anzahl und Art der im Szenario enthaltenen Agenten. Deren Verhalten und die zugehörigen Eigenschaften werden in Klassen der Programmiersprache Java spezifiziert. Den Abschluss bilden szenariospezifische Einstellungen in der Extensible Markup Language (XML), beispielsweise für das Zeitmanagement oder die Visualisierung der Simulation.

Um in PlaSMA Simulationen auf Basis von Szenarien aus der Veranstaltungslogistik durchführen zu können, müssen die notwendigen Informationen aufbereitet und in die drei grundlegenden Bestandteile eines PlaSMA-Szenarios übertragen werden. Als Vorlage dienen hier die in ALEM spezifizierten Bestandteile des selbststeuernden Dispositionssystems mit ihren Komponenten, Eigenschaften und Fähigkeiten. Eine weitere Grundlage jedes Szenarios zur selbststeuernden Disposition sind die Rahmenparameter hinsichtlich der vorhandenen Aufträge, Verleihartikel, Fahrzeuge und Mitarbeiter. Entsprechend dieser Vorgaben werden die Infrastruktur und alle in ihr befindlichen Objekte erzeugt und in eine der drei Szenariokomponenten integriert.

Startpunkt der Szenariogenerierung ist die Übertragung der verschiedenen

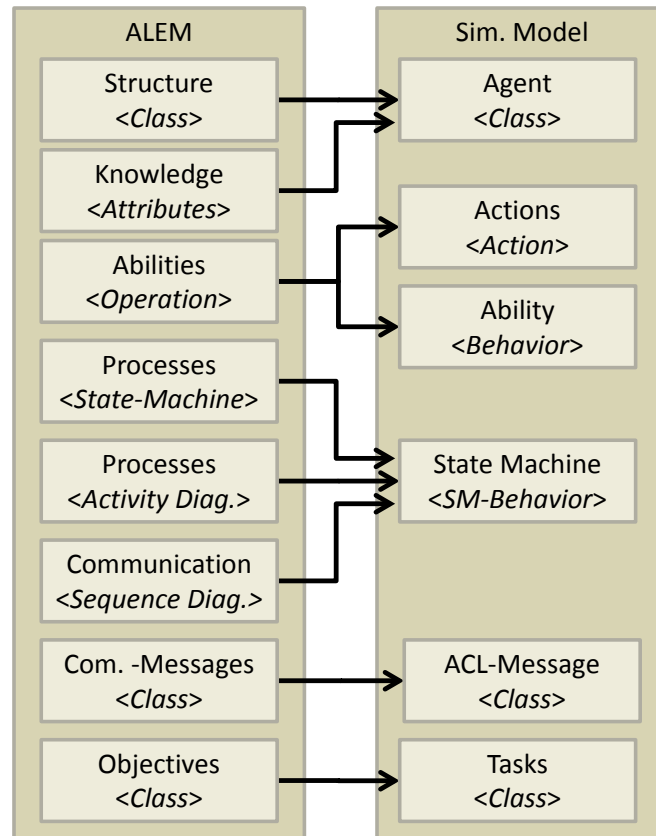


Abbildung 4.24: Abbildung auf ein Simulationsmodell [104]

Sichten in ALEM (siehe Abbildung 4.24). Hier werden z.B. die Elemente aus der Struktursicht als Agentenklassen in der Programmiersprache Java angelegt, die in PlaSMA Verwendung findet. Diese verfügen über das in der Wissenssicht definierte inhärente Wissen in Form von Attributen. Weiterhin sind die Fähigkeiten der einzelnen logistischen Objekte als Funktionen in den Agenten umgesetzt, die in der Simulation als deren Repräsentanten fungieren. So besitzt beispielsweise jeder Verleihartikel-Agent die Funktionen *Verfügbarkeit_prüfen()*, *Komponente_Verfügbarkeit_prüfen()*, *Transport_anfragen()*, *Kosten_berechnen()*, *Angebot_Artikelmanager()*, *Absage_Artikelmanager()* und *Zusage_bestätigen()* (vgl. Abbildung 4.9) und kann diese während des Verhandlungsprozesses aufrufen.

Für die Übertragung der Objektdefinitionen für Fahrzeuge und Komponenten aus ALEM in ausführbare Java-Klassen für PlaSMA wird nun festgehalten, wie lange ein Agent existiert, welches Verhalten er zeigt und mit welchen anderen

Agentenklassen er in der Simulation interagiert. Im Falle des ListManagers umfasst die Lebensspanne des Agenten die gesamte Dauer der Simulation, in deren Verlauf er mit einem oder mehreren Agenten der Klasse ArticleManager korrespondiert. Hierbei wendet er das Verhalten (engl.: Behaviours) *ArticleAssignment* an, das grob in die untergeordneten Verhaltensweisen (Sub-behaviours) *Assignment* und *NewSearch* unterteilt werden kann. Die Verhaltensweisen gehen hierbei auf Abfolgen von Operationen zurück.

Die in der entsprechenden ALEM-Sicht festgelegten Fähigkeiten finden sich entsprechend als Verhaltensweisen und Operationen wieder, die der Agent im Laufe der Simulation zur Anwendung bringt. Das Ausführen der den Fähigkeiten entsprechenden Funktionen beinhaltet den Austausch der in der Kommunikationssicht definierten Nachrichten, die Abfolge der Kommunikation und der wechselseitigen Interaktion bildet die in ALEM festgelegten Prozessabläufe auf die Verhandlungen ab.

Der ListManager initiiert beispielsweise die Verhandlungen hinsichtlich der Ressourcenzuweisung durch eine *AvailabilityRequest*, die er an einen oder mehrere ArticleManager richtet. Der weitere Fortgang der Verhandlungsprozesses ist nun von den extern generierten Rückmeldungen abhängig, auf die der ListManager durch seine Sub-Behaviours reagiert. Das kann z.B. die Fortsetzung der Suche nach passenden Verleihartikeln sein, wenn die Gewünschten nicht verfügbar sind. Es können auch weitere Nachfragen gestartet oder die Kosten für eine Zuweisungsentscheidung berechnet werden.

Nach Abschluss der Modellierung in PlaSMA liegt eine Beschreibung der selbststeuernden logistischen Objekte vor, die alle bereits in ALEM definierten Sichten vereint und als Vorlage für den ausführbaren Programmcode dient. Die folgenden Zeilen zeigen einen Ausschnitt aus dem Quellcode eines Verleihartikelagenten (*ArticleAgent.java*, Codebeispiel 4.1), in dem für die Verfügbarkeitsprüfung die Daten der angefragten Veranstaltung mit dem bisherigen Veranstaltungsplan des Artikels verglichen wird. Kollidieren die Daten für eine Veranstaltung, die den Artikel buchen möchte, mit einer bereits disponierten Veranstaltung, die den Artikel bereits gebucht hat, wird der Boolean (booleaner Wahrheitswert) "true" zurückgegeben. In diesem Falle wäre das Ergebnis der Verfügbarkeitsprüfung für den Verleihartikel negativ ausgefallen und er hätte eine Absage übermittelt.

Listing 4.1: Verfügbarkeitsprüfung aus ArticleAgent.java

Exerpt from ArticleAgent.java

```
/**
 * Checks, whether this event collides with any of the events
 * in the article's schedule.
 * @param event: the event to be checked
 * @return whether this event collides with anything in the
 * schedule
 */

public boolean collides(Event event)
{
    for(Event e: eventSchedule)
    {
        if (e.collides(event))
            return true;
    }
    return false;
}
```

Wird keine Terminüberschreibung entdeckt (Rückgabewert "false"), kann der Artikel mit den Verhandlungen fortfahren, indem er sich direkt mit dem Fleet-Manager wegen des Transports in Verbindung setzt oder die Anfrage an evtl. Komponenten weiterreicht. Die Zurückweisung einer Anfrage wird über die Funktion *refuseRequest()* ausgelöst, die in den folgenden Codezeilen (Codebeispiel 4.2) zu sehen ist. Die Funktion erzeugt eine Antwort und sendet diese an das anfragende Objekt. Im Anschluss wird der Agent wieder in den Status *listening* versetzt, in dem er auf weitere Anfragen wartet. Dieser Status entspricht dem Zustand "*Keine Anfrage*" aus dem ALEM-Lebenszyklus des Verleihartikels (vgl. Abbildung 4.12).

Ergänzend zu der Übertragung der in ALEM definierten Objekteigenschaften, Fähigkeiten und Attribute in Programmcode, ist noch eine Beschreibung der Infrastruktur für die Agenten anzulegen.

Listing 4.2: Absage einer Anfrage aus ArticleNegotiations.java

Excerpt from ArticleNegotiations.java

```

//Creates the negative reply for a request and sets the agent
to the state listening

public void refuseRequest() {
    ACLMessage msg = currentRequest.createReply();
    msg.setPerformative(currentRequest.getPerformative()
        == ACLMessage.CFP ? ACLMessage.REFUSE :
        ACLMessage.DISCONFIRM);
    agent.send(msg);
    stateTransition(State.LISTENING);
}

```

Dieses Welt-, bzw. Infrastrukturmodell, enthält eine Repräsentation des realen logistischen Systems, d.h. im Falle der vorliegenden Arbeit die Veranstaltungen und Transportwege zwischen ihnen als Knoten und Kanten in einem Graphen, auf den die Agenten bei Ihren Verhandlungen zurückgreifen können. So wird beispielsweise bei der Routenplanung auf diesem Graphen die Entfernung zwischen Veranstaltungsorten berechnet und die Möglichkeit zur Aggregation von Teiltransporten zu komplexeren Routen evaluiert. Weiterhin geht die Kostenrechnung für die Transporte auf die zurückgelegte Entfernung zurück, wie sie aus der Kantenlänge des Graphen hervorgeht.

Die Beschreibung des Weltmodells für eine PlaSMA-Simulation erfolgt in der Regel in einer OWL-Datei. Der folgende Ausschnitt zeigt beispielhaft die Beschreibung einer Veranstaltung (Event) in Bremen. Diese Beschreibung beinhaltet die Definition der Veranstaltungen als temporäre Lager von Veranstaltungsausrüstung (Verleihartikel) mit einer bestimmten Kapazität. Diese entspricht dem Umfang der angeforderten Verleihartikel. Weiterhin wird die Lage in Form des Knotennamens aus dem Graphen des Weltmodells angegeben. Die Kanten dieses Knoten werden ebenfalls in OWL dokumentiert und bilden die Entfernungen und Transportwege zwischen den Veranstaltungen ab (Codebeispiel 4.3).

Listing 4.3: Definition einer Veranstaltung (Event) aus scenario.xml

```

<tlo:Event rdf:ID="Event.Bremen">
  <rdf:type rdf:resource="&trans;ISOEvent"/>
  <tlo:storageCapacity
    rdf:datatype="&xsd;float">&tStorageCapacity;
  </tlo:storageCapacity>
  <rdfs:comment xml:lang="en"
    >Example Event in Bremen</rdfs:comment>
  <tlo:positionedAt rdf:resource="&graph;Bremen"/>
</tlo:Event>

```

In dem folgenden Codebeispiel 4.4 ist die Definition des Autobahnabschnittes zwischen der Anschlussstelle Bremen-Arsten und dem Bremer-Kreuz auf der Autobahn A1 zu sehen. Die Beschreibung enthält den Start- und Endpunkt des Routenabschnitts, die und die zugehörige Länge. In diesem Fall beginnt die Kante bei der Autobahnausfahrt, bzw. -auffahrt Bremen-Arsten und führt über 9.5 Kilometer zum Autobahnkreuz Bremen. Ferner ist der Abschnitt der Autobahn A1 zugeordnet und verfügt über eine Verkehrsdichte von 0.15. Dieser Wert zwischen 0 (minimale Verkehrsdichte) und 1 (dichter Verkehr) lässt Schlüsse über die mögliche Geschwindigkeit auf diesem Streckenabschnitt zu, was für die Abwägung möglicher Routenoptionen von Bedeutung sein kann. Generell besteht eine Route aus mindestens einem, in der Regel jedoch mehreren solchen Routenabschnitten, die sich in ihrer Länge, Art und Verkehrsdichte unterscheiden können.

Listing 4.4: Definition einer Autobahnanschlussstelle

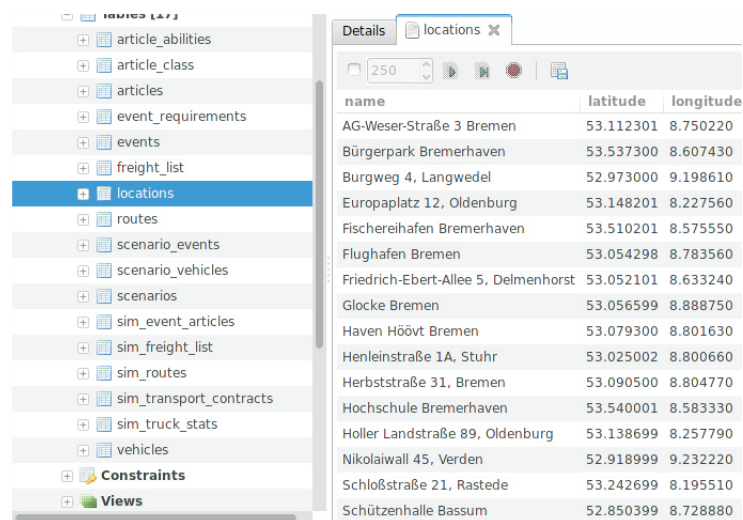
```

<trans:Highway rdf:about="#A1_AD_Bremen-Arsten_AK_Bremen">
  <rdf:type rdf:resource="&owl;Thing"/>
  <tlo:trafficDensity
    rdf:datatype="&xsd;float">0.15</tlo:trafficDensity>
  <tlo:edgeLength rdf:datatype="&xsd;float">9.5</tlo:edgeLength>
  <tlo:startingAt rdf:resource="#AD_Bremen-Arsten"/>
  <tlo:directedTo rdf:resource="#AK_Bremen"/>
</trans:Highway>

```

So lässt eine Autobahn bei gleicher Verkehrsdichte eine größere Durchschnittsgeschwindigkeit zu, was evtl. dazu führt, dass sie einer kürzeren Strecke auf einer Landstraße oder in der Stadt vorgezogen wird.

Für das selbststeuernde Dispositionssystem werden, abweichend vom PlaSMA-Standard, die in den oben aufgeführten Beispielen enthaltenen Informationen nicht in Form von OWL-Dateien vorgehalten, sondern direkt in die Simulationsdatenbank integriert. Dies ist durch den dynamischen Charakter des logistischen Netzwerkes in der Veranstaltungslogistik begründet. Waren PlaSMA und das DLRP ursprünglich darauf ausgerichtet, dynamische Transporte auf einem statischen Netzwerk zu betrachten, disponiert das selbststeuernde System nun mit einer angepassten Variante des DLRP-Algorithmus. Diese fokussiert auf dynamische Transporte in einem veränderlichen Netzwerk (siehe Abschnitt 4.5), die mit einem statischen Fuhrpark durchgeführt werden sollen. Entsprechend ist es wenig sinnvoll, einen kompletten Graphen des möglichen Operationsgebietes (beispielsweise der Bundesrepublik) in das Weltmodell zu integrieren. Zu Optimierungszwecken werden nur die Routen zwischen den tatsächlich relevanten Knoten berücksichtigt, so dass das von der selbststeuernden Disposition betrachtete Weltmodell nur die Veranstaltungsorte und die zwischen ihnen liegenden Verkehrsknotenpunkte enthält. Auf Abbildung 4.25 ist ein Ausschnitt aus dem entsprechenden Bereich einer Szenariodatenbank



The screenshot shows a database interface with a sidebar on the left containing a tree view of categories. The 'locations' category is selected and highlighted in blue. The main area displays a table with the following data:

name	latitude	longitude
AG-Weser-Straße 3 Bremen	53.112301	8.750220
Bürgerpark Bremerhaven	53.537300	8.607430
Burgweg 4, Langwedel	52.973000	9.198610
Europaplatz 12, Oldenburg	53.148201	8.227560
Fischereihafen Bremerhaven	53.510201	8.575550
Flughafen Bremen	53.054298	8.783560
Friedrich-Ebert-Allee 5, Delmenhorst	53.052101	8.633240
Glocke Bremen	53.056599	8.888750
Haven Hööv't Bremen	53.079300	8.801630
Henleinstraße 1A, Stuhr	53.025002	8.800660
Herbststraße 31, Bremen	53.090500	8.804770
Hochschule Bremerhaven	53.540001	8.583330
Holler Landstraße 89, Oldenburg	53.138699	8.257790
Nikolaiwall 45, Verden	52.918999	9.232220
Schloßstraße 21, Rastede	53.242699	8.195510
Schützenhalle Bassum	52.850399	8.728880

Abbildung 4.25: Ausschnitt aus der Datenbank mit Veranstaltungsorten

(Tabelle “Locations“) zu sehen. Diese enthält eine Auflistung der Veranstaltungsorte für eines der in Abschnitt 5.2 betrachteten Szenarien, definiert durch die Längen- und Breitengrade. Die möglichen Strecken zwischen den Veranstaltungsorten werden ebenfalls in entsprechenden Teilen der Datenbank verwaltet, ein Ausschnitt aus der entsprechenden Untertabelle “routes“ ist auf Abbildung 4.26 zu sehen. Hier sind die Streckenabschnitte zwischen den verschiedenen Veranstaltungen sowie deren Länge und der Zeitbedarf angegeben, der für diesen Abschnitt bei einer bestimmten Durchschnittsgeschwindigkeit zu kalkulieren ist. In dem Beispiel ist der Richtwert für einen 7.5t-Kleinlastwagen, bzw. LKW von 40t angegeben, wie er für eine Fahrt über die Autobahn angenommen wird.

Die Übernahme der Daten für die Simulation erfolgt entweder automatisiert aus der Datenbank eines ERPs oder händisch über die graphische Benutzeroberfläche des selbststeuernden Dispositionssystems. Dies ist von der Tiefe und Art der Integration in die IT-Landschaft des anwendenden Unternehmens abhängig, Näheres hierzu wird in Kapitel 4.6.2 behandelt.

from	to	length	time	length80	time80
AG-Weser-Straße 3 Bremen	Bürgerpark Bremerhaven	54858	2237	54858	3356
AG-Weser-Straße 3 Bremen	Burgweg 4, Langwedel	41038	1955	41038	2933
AG-Weser-Straße 3 Bremen	Europaplatz 12, Oldenburg	55281	2479	55281	3719
AG-Weser-Straße 3 Bremen	Fischereihafen Bremerhaven	54258	2414	54258	3621
AG-Weser-Straße 3 Bremen	Flughafen Bremen	9171	749	9171	1124
AG-Weser-Straße 3 Bremen	Friedrich-Ebert-Allee 5, Delmenhorst	18691	1399	18691	2099
AG-Weser-Straße 3 Bremen	Glocke Bremen	12803	1282	12803	1923
AG-Weser-Straße 3 Bremen	Haven Hööv't Bremen	5468	521	5468	782
AG-Weser-Straße 3 Bremen	Henleinstraße 1A, Stuhr	14194	1252	14194	1878
AG-Weser-Straße 3 Bremen	Herbststraße 31, Bremen	5650	630	5650	945
AG-Weser-Straße 3 Bremen	Hochschule Bremerhaven	59560	2397	59560	3596
AG-Weser-Straße 3 Bremen	Holler Landstraße 89, Oldenburg	49524	2176	49524	3264
AG-Weser-Straße 3 Bremen	Nikolaiwall 45, Verden	47493	2193	47493	3290
AG-Weser-Straße 3 Bremen	Schloßstraße 21, Rastede	63640	2625	63640	3938
AG-Weser-Straße 3 Bremen	Schützenhalle Bassum	38603	2348	38603	3522
AG-Weser-Straße 3 Bremen	Stadthalle Bremen	40509	2624	40509	3936

Abbildung 4.26: Ausschnitt aus der Datenbank mit Strecken zwischen Veranstaltungen

4.4.2 Simulation

Der Ablauf einer Simulation lässt sich grob in drei Phasen unterteilen. Dies sind die Erzeugung der für die Simulation relevanten Objekte, bzw. der sie repräsentierenden Agenten und des zugrundeliegenden Weltmodells, die eigentliche Simulation und die Ausgabe der Simulationsergebnisse.

Wie im vorigen Abschnitt beschrieben, werden abweichend von der ursprünglichen Vorgehensweise in PlaSMA, alle für die Simulation notwendigen Daten in der Szenariodatenbank vorgehalten. Neben den zu simulierenden Objekten, den Veranstaltungs-, bzw. Auftragsdaten und der Struktur des logistischen Systems, enthält die Datenbank die Konfiguration für den Ablauf der Simulation. Hierzu gehören beispielsweise Informationen über die maximale Geschwindigkeit und Dauer der Simulation. Der folgende Programmcode (Beispiel 4.5) ist der PlaSMA-Dokumentation entnommen und soll als Beispiel für die Standardvorgehensweise der Szenariokonfiguration mittels einer XML-Datei dienen [103]. Hierbei ist der einleitende Kopf (engl. Header) der Datei zu sehen.

Listing 4.5: Kopf einer Szenariodefinition

```
<?xml version="1.0" encoding="ISO-8859-1"?>

<!-- Beispiel einer Szenariokonfiguration -->

-<simulation seed="1230796800000" maxSpeed="10000" maxSimLength="10d"
  repeats="1" simStartTime="1230796800000" name="Container
  Transport, Germany" xsi:noNamespaceSchemaLocation=
"http://plasma.informatik.uni-bremen.de/xml_schemas/config.xsd"
  xmlns:xsi="http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance">
  <description>Default Logistics Scenario (Germany)</description>
  <sync timeout="20" maxSyncDist="15min" minSyncDist="20sec"/>
```

Im darauf folgenden Rumpf der Konfigurationsdatei werden weitere Objekte, ihre Verantwortlichkeiten innerhalb der Simulation sowie die Zeitpunkte ihrer Erzeugung definiert (Beispiel 4.6).

Listing 4.6: Rumpf einer Szenariodefinition

```

<!-- Teil des Rumpfes einer Szenariokonfiguration -->

agent name="Management.TZI_Logistics"
  class="org.tzi.plasma.toolkit.forwardingagency.agent
.Agent_ForwardingAgency" description="TZI Logistics Forwarding
Agency" enabled="true"> <attribute
key="incoming_order_handling_mode" value="CREATE_ORDER"/>
<attribute key="run_mode" value="CENTRAL_PLANNING"/> <attribute
key="load_generation_single_amount" value="5"/> <attribute
key="load_generation_periodic_amount" value="2"/> <attribute
key="load_generation_periodic_interval" value="7h"/> <attribute
key="load_generation_stochastic_amount" value="1"/> <attribute
key="load_generation_stochastic_interval" value="3h"/>

-<agent name="TruckOp.TZI_Logistics.01"
  class="org.tzi.plasma.toolkit.truck.agent.Agent_TruckManagement"
description="TZI Truck Management Agent (1)" enabled="true"
creationDate="1230800400000"> <attribute key="operatesFor"
value="http://plasma.informatik.uni-bremen.de/owl/default_germany.owl
#TZI_Logistics"/>
<attribute key="representsObject"
value="http://plasma.informatik.uni-bremen.de/owl/default_germany.owl
#Truck.TZI_Logistics.01"/>

```

Die in den Beispielausschnitten dargestellten Informationen werden auch für die Simulation im Rahmen der selbststeuernden Disposition benötigt und finden sich entsprechend in der Datenbank wieder. Die Erstellung der Datenbank findet zu Beginn der Simulation automatisiert statt. Im Anschluss an die Erzeugung der Szenariodatenbank wird die eigentliche Simulation angestoßen, sie verläuft nach dem in Abschnitt 4.2.1 beschriebenen Schema und endet entweder mit der Ausgabe einer gefundenen Lösung oder mit einem Abbruch. In letzterem Fall werden in der Szenariokonfiguration zusätzliche Ressourcen, beispielsweise in Form von Mietfahrzeugen oder -artikeln freigegeben und ei-

ne erneute Simulation durchgeführt. Wird auch durch wiederholte Simulation keine zufriedenstellende Lösung ermittelt, muss die zugrundeliegende Grobplanung geprüft und ggf. modifiziert werden.

Die Ausgabe der ermittelten Planungsergebnisse erfolgt, je nach Ausgestaltung der Systemarchitektur, über eine eigene grafische Benutzeroberfläche oder über das angeschlossene ERP-System (vgl. Abschnitt 4.6). Die im Rahmen dieser Arbeit implementierte Ausgabevariante ist Thema des folgenden Abschnitts.

4.4.3 Ausgabe der Planungsergebnisse

Hinsichtlich der enthaltenen Informationen besteht zwischen den beiden Varianten der Ergebnisdarstellung und -ausgabe kein Unterschied. Erfolgt die Betrachtung über ein angeschlossenes ERP-System, kann die Aufbereitung jedoch in Abhängigkeit von Konfiguration und Systemgestaltung des ERPs variieren. Für ein leichteres Verständnis beschränken sich die folgenden Erläuterungen auf die Darstellung innerhalb des entwickelten selbststeuernden Dispositionssystems.

Wie bereits im Soll-Prozess festgelegt, erzeugen die Simulationen in PlaSMA alle planungsrelevanten Informationen, die für die Auftragsabwicklung in der Veranstaltungslogistik notwendig sind. Hierbei ergeben sich aus der konkreten Zuordnung von Verleihartikeln zu Veranstaltungen und der darauf basierenden Routenplanung der Transportfahrzeuge Lade- und Kommissionierlisten sowie Personaleinsatzpläne. Diese werden bei der operativen Durchführung der Veranstaltungen direkt umgesetzt.

Die Darstellung der Planungsinformationen in der grafischen Benutzeroberfläche Autonomous Distribution of Rental Articles (AuDiRea) erfolgt in verschiedenen Ansichten, die jeweils eine andere Perspektive einnehmen. So kann beispielsweise aus einer Liste der aktuell durchzuführenden und vollständig geplanten Veranstaltungen direkt auf die jeweils zugeordneten Artikel zugegriffen werden (siehe Abbildung 4.27). In diesem Beispiel ist als Veranstaltung eine Konferenz ausgewählt, der in der Grobplanung insgesamt 29 Artikel aus acht Artikelfamilien (Bühne, Kabelkoffer, Catering, etc.) zugewiesen sind. Die selbststeuernde Disposition weist nun in der Detailplanung die gewünschte Anzahl von Artikel aus den entsprechenden Artikelfamilien in Abhängigkeit von den Bedingungen hinsichtlich Ort und Zeitpunkt der Veranstaltung fest zu.

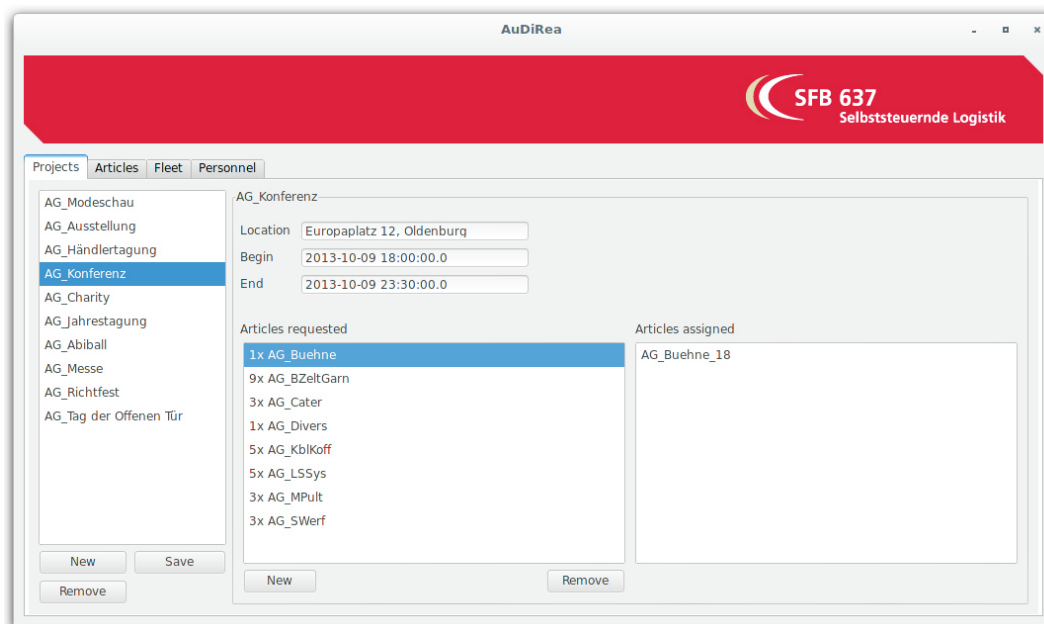


Abbildung 4.27: Ausgabebeispiel für eine Veranstaltung

Hier fällt die Wahl für den konkreten Artikel aus Artikelfamilie „Bühne“ beispielsweise auf die Bühne Nr. 18. Analog wird mit den restlichen angeforderten Veranstaltungsartikeln verfahren, so dass sich aus den Einzelposten dieser Ansicht die vollständige Artikelliste für die betreffende Veranstaltung ergibt. Diese kann für Abrechnungszwecke sowie für die Kontrolle der Anlieferung während der Veranstaltungsvorbereitung herangezogen werden. Betrachtet man nun die Disposition aus der Perspektive des Veranstaltungsartikels, so erhält man einen detaillierten Überblick der Veranstaltungen, denen dieser momentan zugewiesen ist (Abbildung 4.28).

Im gewählten Fall ist die Bühne Nr. 18 nur einer Veranstaltung zugeteilt; einer Konferenz, die am Abend des 09.10.2013 am Europaplatz in Oldenburg stattfindet. Über die Veranstaltungszuweisung hinaus sind auch die Details des Transports ersichtlich. So erfolgt hier die Anlieferung der Bühne aus Bremen nach Oldenburg durch ein Mietfahrzeug (3.5t), während die Rückführung durch ein anderes Fahrzeug (7.5t) aus dem Pool des Beispielunternehmens erfolgt.

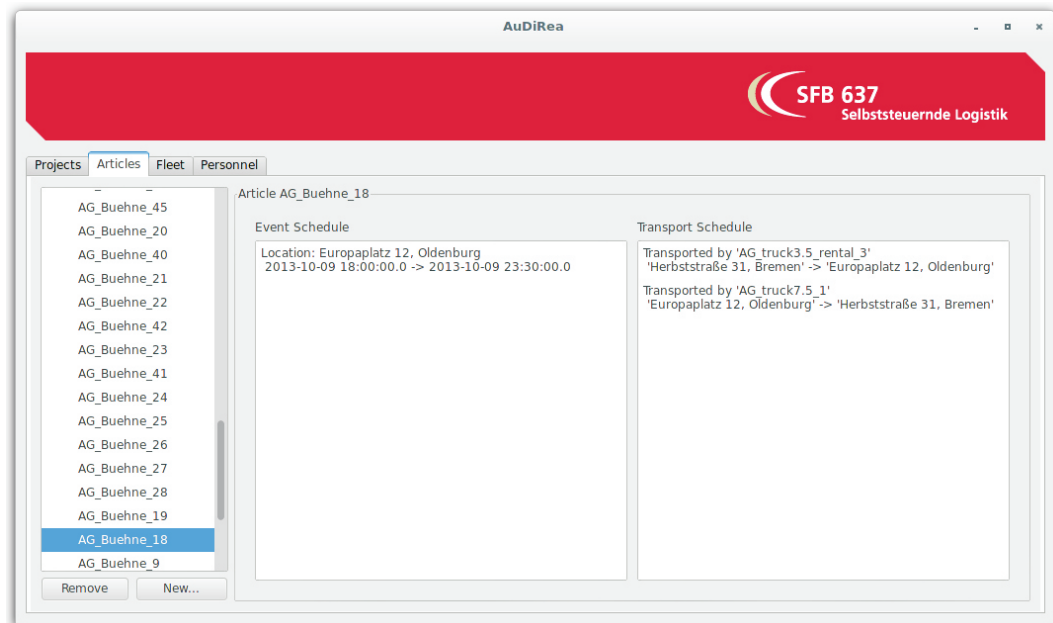


Abbildung 4.28: Ausgabebeispiel für einen Artikel

Die Artikelansicht lässt sich zur Nachverfolgung von Artikelzuordnungen einsetzen und bildet die Grundlage für die Kommissionierlisten, nach denen sich die Bereitstellung der Artikel im Lager und an den Veranstaltungsorten richtet. Die Transportdisposition kann schließlich über die Flottenansicht detailliert verfolgt werden (Abbildung 4.29). Hier sind alle verfügbaren Fahrzeuge mit ihren Eigenschaften, Routen und den zu transportierenden Artikeln aufgelistet. Die Auflistung umfasst sowohl den festen Fahrzeugpool des Veranstaltungsdienstleisters als auch potentielle Mietfahrzeuge. Dieses Verfahren ist an den betrachteten Praxisfall angelehnt. Das Beispielunternehmen verfügt durch die häufige Inanspruchnahme von Mietfahrzeugen über gute Kontakte zu den entsprechenden Mietwagenfirmen und kann entsprechend kurzfristig Zumietungen vornehmen. Um die Handhabung der Fremdfahrzeuge in der Disposition zu vereinfachen, werden diese im eigenen Fahrzeugbestand geführt. Vor der manuellen Freigabe ihrer Nutzung durch den Disponenten wird der Bestand jedoch mit null angegeben.

Aus den weiteren Details der Ansicht werden die für die Disposition relevanten Daten des Fahrzeuges ersichtlich. Dies sind die Geschwindigkeit sowie die

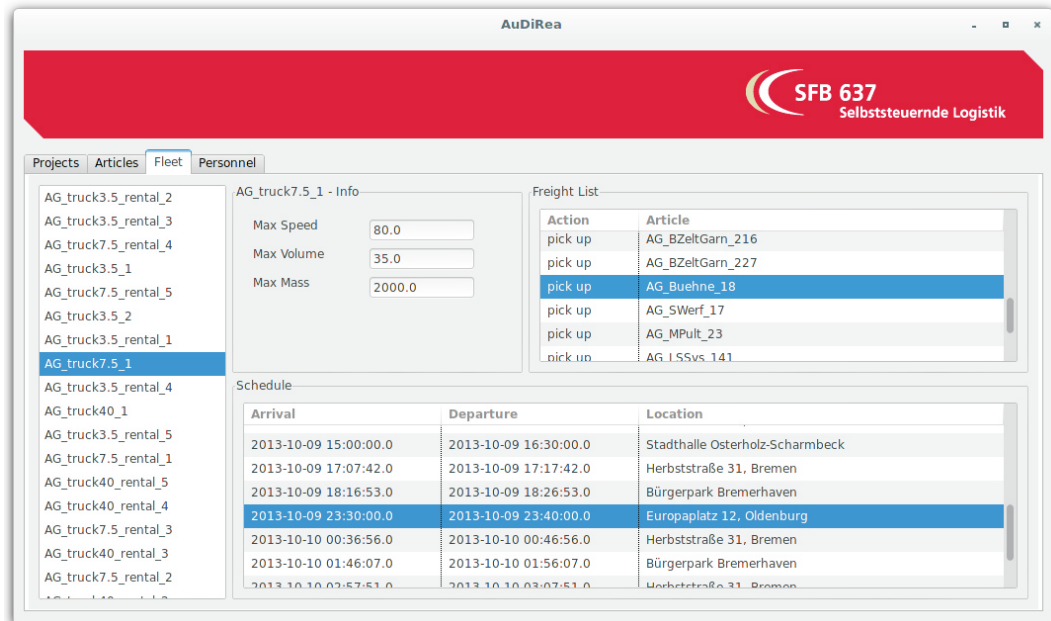


Abbildung 4.29: Ausgabebeispiel für ein Fahrzeug

Transportkapazität, aufgeschlüsselt nach Rauminhalt (Volumen in Kubikmetern) und das Gewicht in Tonnen. Die Angabe der Geschwindigkeit bezieht sich hier auf die Durchschnittsgeschwindigkeit, mit der auch bei der Routenplanung gearbeitet wird.

Aus den Details ist weiterhin ersichtlich, dass die oben betrachtete Bühne Nr. 18 für die Beispielkonferenz von dem für den Rücktransport vorgesehenen 7.5-Tonner zwischen 23.30 und 23.40 Uhr in Oldenburg eingeladen wird. Die Route des Fahrzeuges führt zuvor von Osterholz-Scharmbeck über Bremen und Bremerhaven. Die entsprechenden Informationen bilden die Grundlage für die Routenplanung des entsprechenden Fahrzeuges und die Lade- und Kommissionierlisten an den verschiedenen Veranstaltungsorten. Diese Informationen werden vom Lager- und Fahrpersonal direkt verarbeitet.

4.5 Touren- und Routenplanung mit dem DLRP

Die Routenplanung für die Transportfahrzeuge durch das selbststeuernde Dispositionssystem basiert auf einer Adaption des $DLRP_t$. Diese Anpassung setzt das DLRP für die Transportlogistik als Agentenverhalten innerhalb der PlaSMA-Simulation um, so dass nach Abschluss der Simulationsläufe neben der Transportplanung und der allgemeinen Ressourcenallokation auch die Fahrstrecken der eingesetzten Fahrzeuge zur Verfügung stehen. Die bei der Implementierung vorgenommene Adaption betrachtet, neben der Integration in den Simulationsablauf, hauptsächlich die Modifikation des ursprünglichen Routenfindungsalgorithmus hinsichtlich der Spezifika der Veranstaltungslogistik.

Das Originalkonzept des DLRP betrachtet ein stabiles Netzwerk aus Orten (Knoten) und Verbindungen zwischen diesen (Kanten) [87]. Innerhalb dieses Netzwerkes entstehen an jedem Knotenpunkt kontinuierlich Güter, die von ihrem Entstehungsort zu einem Ziel innerhalb des Netzwerkes transportiert werden müssen. Für den Transport steht ein dynamisch wechselnder Pool von Transportfahrzeugen zur Verfügung, der sich auf bekannten, teilweise veränderlichen Routen durch das Netzwerk bewegt und in Abhängigkeit von bereits geplanten Transportvorgängen für bestimmte Teilabschnitte freie Transportkapazitäten anbieten kann. Diese freien Kapazitäten können von Gütern über Verhandlungen belegt werden, wodurch sich eine dezentrale, kooperative Planung ergibt (vgl. Kapitel 2.6). Grundlage dieser Planungen ist die Funktion der Netzwerknoten als Informationsverteiler, über die Güter und Fahrzeuge ihre Bedarfe abstimmen und die Auslastung der verfügbaren Kapazitäten koordinieren können. Die wechselseitige Planung wird hierbei von den Zielfunktionen geleitet, die das Verhalten der autonomen Objekte innerhalb des logistischen Systems motivieren.

Das in dieser Arbeit entwickelte selbststeuernde Dispositionssystem überträgt nun die Grundzüge des DLRP auf den Transport von Verleihartikeln in der Veranstaltungslogistik. Hier trachten, analog zum eingangs beschriebenen allgemeinen DLRP-Szenario, autonome selbststeuernde Objekte nach einem möglichst effizienten Transport innerhalb eines Logistiknetzwerkes. Die Ziele der Transportmittel und -güter sind hierbei ebenfalls individuell und sollen in einer kollaborativen Planung durch wechselseitige Verhandlungen erfüllt werden.

Die konkrete Umsetzung erfordert jedoch die Berücksichtigung anwendungsspezifischer Unterschiede zwischen dem allgemeinen Ansatz des DLRP und den Anforderungen der Veranstaltungsbranche und ihrer Logistik.

So ist das logistische Netzwerk in der Veranstaltungsbranche variabel, d.h. die Knotenpunkte stellen einen dynamischen Faktor dar, während die Transportmittel eine fest definierte Größe sind. Dies ist durch den temporären Charakter der Veranstaltungen bedingt, die nur für eine bestimmte Dauer innerhalb des Netzwerkes präsent sind. Dieser Zeitraum wird durch die eigentliche Dauer der Veranstaltung und zusätzliche Pufferzeiten für Anlieferung, Auf- und Abbau sowie Abtransport der Veranstaltungsausrüstung definiert. Die Transportmittel in der Veranstaltungslogistik sind hingegen als weitgehend statisch zu betrachten, da in der Regel mit einer fest definierten Fahrzeugflotte operiert wird. Diese kann nur temporär, über zugemietete Fremdfahrzeuge, erweitert werden. Im Hinblick auf die Dynamik ergibt sich somit eine Verschiebung von einem statischen Netzwerk mit dynamischen Transportmitteln, wie es das ursprüngliche Anwendungsfeld des DLRP vorsieht, hin zu einem dynamisch veränderlichen Netzwerk, das von einem nur bedingt variablen Fahrzeugpool bedient wird.

Als weiterer Unterschied zur Grundkonzeption des DLRP sind die Transportgüter zu sehen. Diese sind in der Veranstaltungslogistik Verleihartikel, d.h. die Güter zirkulieren innerhalb des logistischen Systems. Bisher betrachtet das DLRP jedoch Güter, die an Knoten des Netzwerkes entstehen und nach ihrem Transport zum einem Zielknoten aus dem logistischen System entfernt werden. Diese Betrachtungsweise ist, leicht vereinfacht, als Zusammenhang zwischen Herstellung und Verbrauch von Konsumgütern zu verstehen. Weiterhin wird die Weiterverarbeitung komplexer Güter in Lieferketten (engl. Supply Chains) auf diese Art abgebildet. D.h. Rohstoffe und/oder Halbzeuge werden hergestellt, transportiert und am Zielort verbraucht. Nach dem Entfernen dieser ursprünglichen Güter können sie, als weitere Zwischenstufe oder Endprodukte, wieder im System auftauchen, wo sie weitertransportiert werden, beispielsweise zu einem weiteren Schritt der Herstellungskette, einem Endkunden oder Zwischenhändler.

Die Verleihartikel für die Veranstaltungsdurchführung verbleiben hingegen im System, bis sie durch Diebstahl, Beschädigung oder das Ende ihres Lebens-

zyklus ausscheiden. In diesem Fall werden sie in der Regel ersetzt, so dass, analog zu den Transportmitteln, ein weitgehend statischer Pool von Transportgütern zu bewegen ist. An dieser Stelle sei erwähnt, dass hier Ausnahmen existieren. Hierbei handelt es sich um Artikel für den einmaligen Gebrauch, wie z.B. Einweggeschirr. Hier ist keine Modifikation des DLRP notwendig. Für das selbststeuernde Dispositionssystem stellt das Umlaufmanagement von Verleihartikeln jedoch den Regelfall dar. Für diesen sind die im Folgenden dargestellten Modifikationen des DLRP notwendig.

Ausgangspunkt der Adaption sind die nachstehenden Überlegungen. Jeder in der Grobplanung angeforderte Verleihartikel wird im Laufe des Dispositionsprozesses einer oder mehreren Veranstaltungen zugewiesen, was zu entsprechenden Abfolgen von Transporten führt. Diese können von einem oder mehreren Fahrzeugen durchgeführt werden. So kann, beispielsweise bei einer Tour, eine identische Ladung für eine Kette von Veranstaltungen (Tournee) genutzt werden und der Transport zwischen diesen mit demselben Fahrzeug erfolgen. Ebenso kann ein Artikel bei mehreren aufeinanderfolgenden Veranstaltungen zum Einsatz kommen, die in keinem inhaltlichen oder sonstigen Zusammenhang stehen. Hier kann jeder Teiltransport von einem anderen Fahrzeug durchgeführt werden, der Artikel würde verschiedenen Teilrouten unterschiedlicher Fahrzeuge zugewiesen.

Darauf aufbauend kann ein Fahrzeug eine aber auch mehrere Veranstaltungen ganz oder in Teilen bedienen. Die Ladung kann hierbei zwischen dem Zentrallager und einer Veranstaltung oder zwischen verschiedenen Veranstaltungen transportiert werden. Es ist weiterhin davon auszugehen, dass ein Verleihartikel ins Lager zurückkehrt, die Anzahl der Zwischenstationen jedoch keinerlei Beschränkung unterliegt und der Zeitpunkt für die Rückkehr nicht im Voraus festgelegt wird.

Der Initialstandort eines Artikels kann ein Veranstaltungsort oder das Zentrallager sein, während bei Fahrzeugen eine Rückkehr ins Lager angestrebt wird. Entsprechend starten und beenden Fahrzeuge ihre Touren im Lager. Routen, die Übernachtungen erfordern, wären generell möglich, müssen jedoch vom Projektmanager gestattet werden. Im Praxisfall wird bei Veranstaltungen in entsprechender Entfernung zum Zentrallager in der Regel mit lokalen Unternehmen kooperiert, so dass nur die Koordination im Beispielunternehmen ver-

bleibt. Eine Anwendung des selbststeuernden Dispositionssystems wäre aber auch auf mehrere Lager mit definierten regionalen Zuständigkeiten anwendbar.

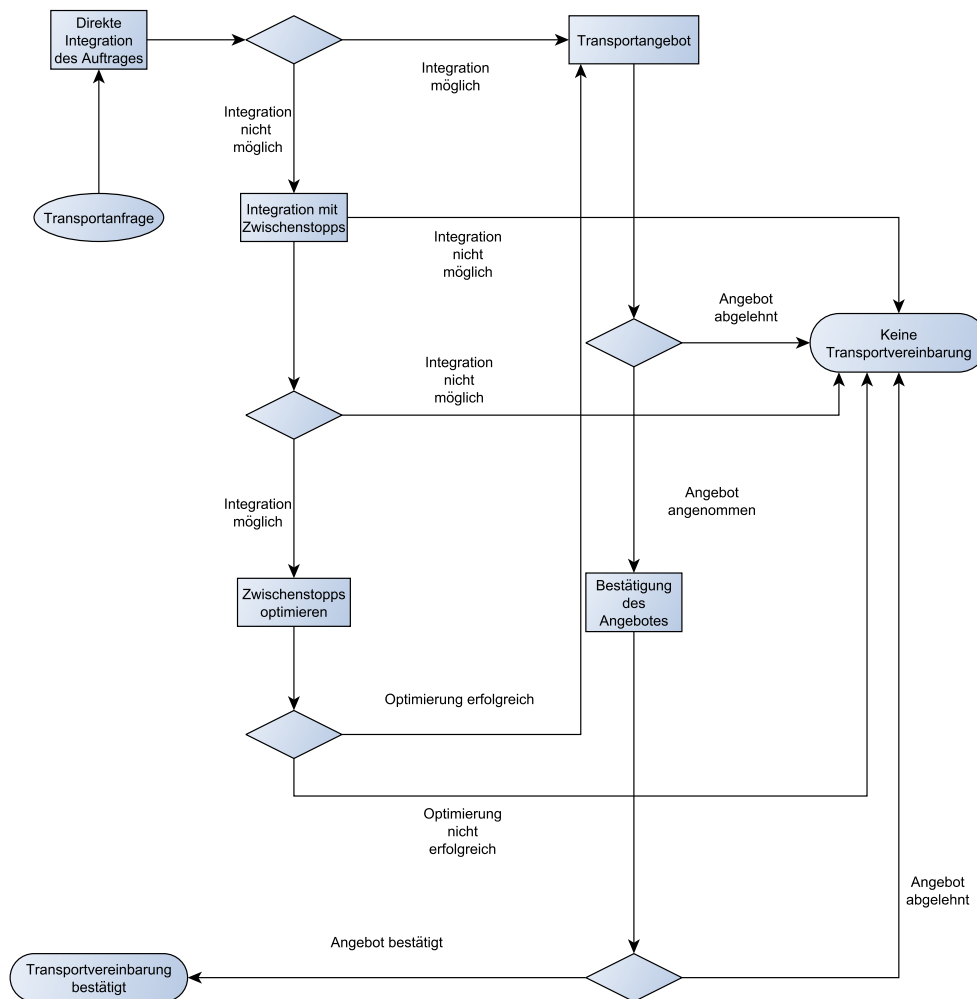


Abbildung 4.30: Vorgehen bei der Tourenplanung

Basierend auf den dargelegten Annahmen verläuft die Routenplanung für jedes Fahrzeug nach dem folgenden Muster ab (vgl. Abbildung 4.30). Erhält ein Transportfahrzeug im Simulationsverlauf eine Transportanfrage, wird der betreffende Auftrag vorläufig in die Auftragsliste des Fahrzeuges aufgenommen. Der Auftrag wird hierbei durch seine Rahmendaten repräsentiert. Diese bestehen aus dem Veranstaltungsort sowie dem Start- und Endzeitpunkt, inklusive der Zeitpuffer für Auf- und Abbau der Veranstaltungsausrüstung. Zusammen mit dem Volumen und dem Gewicht des anfragenden Artikels ergeben sich

die für den Transport zu erfüllenden Bedingungen (engl. Constraints). Im Folgeschritt versucht das Transportmittel, unter den vorhandenen Bedingungen eine Route zu konstruieren, die alle Vorgaben erfüllt. Hierbei werden der potentielle Neuauftrag sowie alle bereits geplanten Aufträge berücksichtigt. Ist dies möglich, ohne einen Zwischenstopp im Lager einzulegen und ohne, dass eine Überlast auftritt, werden die Kosten der Route ermittelt und als Angebot zurückgegeben.

Die Kosten der neu berechneten Route entsprechen hierbei dem Zusatzaufwand, der sich durch die Integration des neuen Auftrags in die Auftragsliste, ausgedrückt durch die entsprechende Erweiterung der bestehenden Route, ergibt. Ermittelt wird der Integrationsaufwand entsprechend durch die Differenz aus den alten und neuen Kosten für alle Aufträge des Fahrzeuges:

$$c_{int} = \left(c_{hr} \cdot t + c_{km} \cdot \sum_{i=1}^{TA_{neu}} l \right) - \left(c_{hr} \cdot t + c_{km} \cdot \sum_{i=1}^{TA_{alt}} l \right) \quad (4.1)$$

mit

c_{int} : Integrationskosten für einen neuen Auftrag

c_{hr} : Fahrzeugkosten pro Stunde

t : Einsatzdauer des Fahrzeuges in Stunden

c_{km} : Kilometerkosten des Fahrzeuges

l : Strecke eines Auftrages in Kilometern

TA_{alt} : Anzahl der Transportaufträge vor der Integration

TA_{neu} : Anzahl der Transportaufträge nach der Integration

Berücksichtigung finden die durchschnittlichen Fahrzeugkosten pro Kilometer und pro Stunde. Ersteres setzt sich aus Teilbeträgen für Treibstoff und Versicherung zusammen und wird detailliert in der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung in Abschnitt 5.3 betrachtet. Die Kosten pro Stunde stellen einen Faktor dar, der als Strafe für Wartezeiten fungiert. Diese wird berechnet, wenn ein Fahrzeug für die Erfüllung eines Auftrages eine gewisse Zeit, beispielsweise über eine ganze Veranstaltung hinweg, ohne Tätigkeit an einem Ort verbleibt. Hierfür wird ein entsprechender Malus fällig, der noch an Bedeutung gewinnt, wenn es sich um ein Mietfahrzeug handelt. Diese verursachen hohe Mietkosten pro Stunde und sollten entsprechend nicht für Aufträge eingesetzt werden, die ein

Warten auf die Verfügbarkeit von Artikeln und/oder Personal erfordern.

Kann auf Anhieb keine Route ermittelt werden, die ohne Überlast eine direkte Integration des potentiellen Neuauftrages ermöglicht, werden Zwischenstopps in die Route integriert. D.h., es wird versucht, eine Route zu konstruieren, die zwischen den verschiedenen Veranstaltungen zum Lager zurückführt, so dass Ladebewegungen zum Ausgleich der Überlast möglich sind. So kommt für diesen Schritt (im Extremfall) eine sternförmige Routenführung zustande, die nach jeder Veranstaltung ins Lager zurückführt. Ist auch eine solche Route nicht ohne Überlast zu konstruieren, wird die Routenplanung abgebrochen und eine entsprechende Absage an den anfragenden Verleihartikel gesendet.

Wird eine solche Route jedoch gefunden, so liegt zumindest theoretisch die Möglichkeit vor, den Auftrag zu verarbeiten. Im nächsten Planungsschritt wird sukzessive der Zwischenstopp entfernt, der jeweils den größten Anteil an der Gesamtfahrzeit besitzt. Ist eine Routenlänge erreicht, die von dem Transportfahrzeug ohne Überschreitung der maximalen Fahrtdauer bedienbar ist, wird im letzten Schritt die Anzahl der Zwischenstopps solange reduziert, bis die kürzeste Route gefunden ist, die alle Bedingungen erfüllt und von dem Fahrzeug auf der maximal zugelassenen Tourendauer gefahren werden kann. Für diese Route wird auf Basis der oben aufgeführten Kostenfunktion ein Angebot berechnet und abgegeben. Führen auch diese Optimierungsschritte nicht zu einer Lösung, wird eine Absage an den anfragenden Artikel erteilt.

Bis zur Bestätigung oder Absage des Angebotes verbleibt die vorläufige Route in der Auftragsliste. Dieser Schritt ist mit den Route Announcements im ursprünglichen DLRP vergleichbar. Wird der Routenvorschlag angenommen, gilt die Route als bestätigt und stellt für zukünftige Anfragen die Planungsgrundlage dar. Als Zwischenschritt wird zusätzlich noch geprüft, inwiefern sich die Kosten des Transportes für die anderen Aufträge, bzw. die diesen zugeordneten Verleihartikel durch die Erweiterung der Route verschieben. Es kann der Fall eintreten, dass die Kostenschranke eines Verleihartikels durch die neue Routenführung überschritten wird und dieser seine Transportvereinbarung aufkündigt. In diesem Fall ist die Route entsprechend neu zu kalkulieren und durch die verbleibenden Artikel erneut zu bestätigen.

4.6 Systemarchitektur

Die Architektur des selbststeuernden Dispositionssystems setzt sich aus dem Modul zur Informationserfassung als Hardwarepart und dem Simulationswerkzeug auf Basis von PlaSMA als Softwarepart zusammen. In den folgenden Abschnitten wird zuerst die Gesamtstruktur des Systems beleuchtet und anschließend ein Konzept zur Integration der selbststeuernden Disposition in die Prozesse und IT-Systeme des Beispielunternehmens entwickelt. Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass zum Zeitpunkt der Niederschrift dieser Dissertation noch keine Einführung der selbststeuernden Disposition im Beispielunternehmen stattgefunden hat und sich die folgenden Ausführungen entsprechend auf die konzeptionelle Ebene beschränken.

4.6.1 Systemkomponenten

Der generelle Aufbau des Systems ist in Hard- und Software zu unterteilen. Ersteres stellt hauptsächlich das Hardwaremodul zur Informationsakquise am Veranstaltungsort dar. Ergänzt wird der Hardwareteil des selbststeuernden Dispositionssystems durch die Rechenkomponenten, die zum Betrieb der Simulationssoftware und der dieser zugrunde liegenden Datenbank notwendig sind (siehe Abbildung 4.31). Umfang und Konfiguration der Betriebshardware für die Simulation sind vom Grad der prozessualen und technischen Integration abhängig. Hierfür wird im folgenden Abschnitt 4.6.2 ein detailliertes Konzept entwickelt. Der generelle Aufbau des Systems sowie das Zusammenspiel der Komponenten bleiben hiervon weitgehend unberührt.

Das Hardwaremodul stellt einen in sich abgeschlossenen Teil des Systems dar, der ausschließlich über Schnittstellen an das Dispositionssystem angebunden ist. Hier steht die Aktualisierung der Datenbank mit Materialflussinformationen von den Veranstaltungsorten im Vordergrund. Für den Betrieb des Dispositionssystems ist ein Server für die betreffende Datenbank und die Simulationssoftware auf Basis von PlaSMA notwendig. Das Gesamtsystem besteht zusätzlich aus mehreren Hardwaremodulen, deren Anzahl von Größe und Beschaffenheit des Fuhrparks abhängig ist. Im Falle des Beispielunternehmens wären insgesamt sechs Transportfahrzeuge mit je einem Modul auszurüsten. Das Dispositionssystem benötigt minimal einen Server für den Betrieb, kann

jedoch in Abhängigkeit von der vorliegenden IT-Landschaft wahlweise auf einem eigenen Rechner bzw. in einer virtuellen Maschine betrieben werden [100].

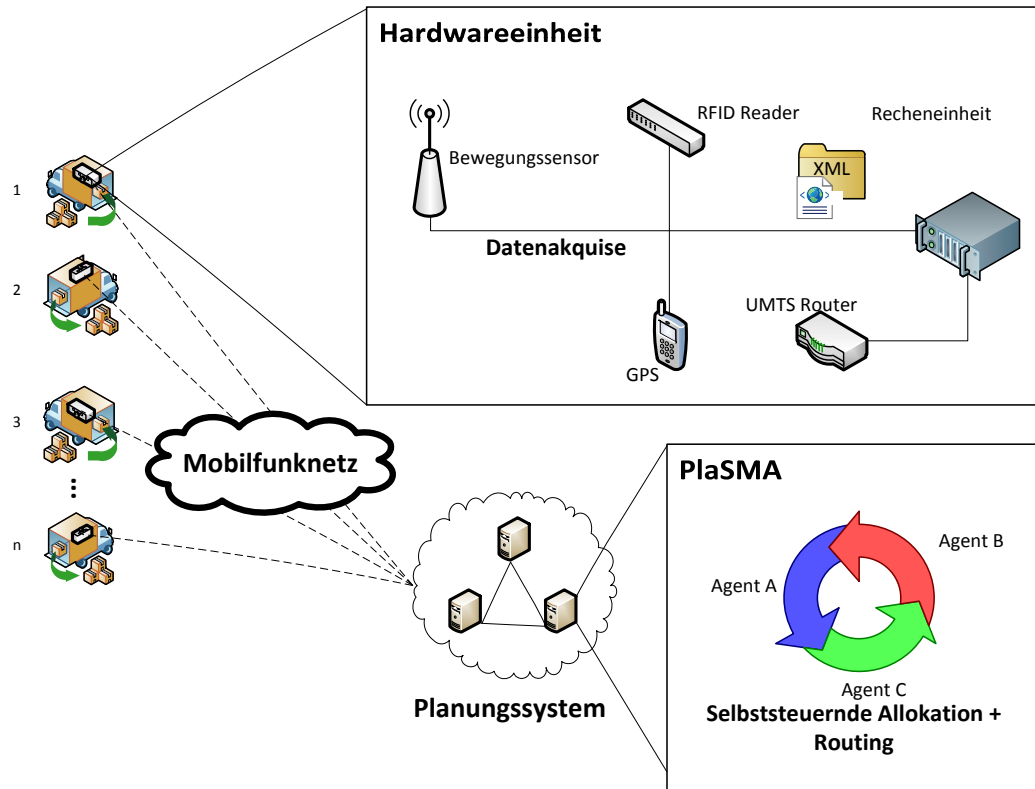


Abbildung 4.31: Komponenten des Dispositionssystems [99]

4.6.2 Systemintegration

Die Integration der einzelnen Systemkomponenten muss sowohl von der technischen Perspektive als auch aus der Prozesssicht heraus betrachtet werden [100, 105]. Das Hardwaremodul für die Informationserfassung ist hierbei aus beiderlei Hinsicht recht einfach zu integrieren. Aus der Prozessperspektive ist lediglich eine kleine Abwandlung der Ladeprozesse an den Veranstaltungsorten und der Vor- und Nachbereitung im Zentrallager erforderlich (siehe Abbildung 4.32). Ersteres betrifft die Montage und Demontage des Moduls am Transportfahrzeug vor dem Beginn und nach der Beendigung der Ladevorgänge am Veranstaltungsort. Hierfür ist die Gestaltung des Moduls bereits so ausgerichtet,

das nur wenige Handgriffe notwendig sind und die Durchführung der Materialbewegungen kaum verzögert und durch das montierte Modul nur minimal behindert wird (siehe Kapitel 4.2.2).

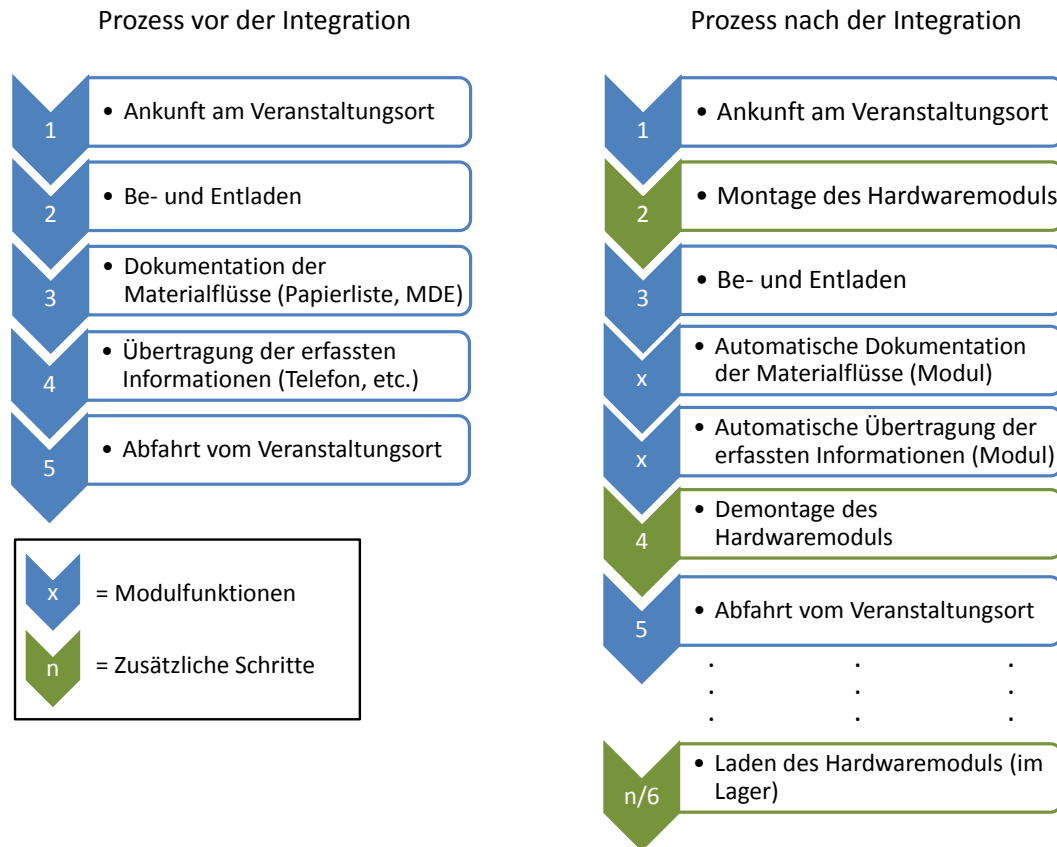


Abbildung 4.32: Integration des Hardwaremoduls in die Ladeprozesse am Veranstaltungsort

Letzteres betrifft das Aufladen der Energiequelle des Moduls nach dem Einsatz. Dies kann in der Regel zwischen der Verwendung bei Transporten, vorrangig über Nacht, geschehen. Die technische Integration des Hardwaremoduls in das Gesamtsystem des Beispielunternehmens erfolgt auf der Schnittstellenebene (Interface Level [100, 106, 107]). Hier wird die bestehende Softwarearchitektur im Kern beibehalten und eine kostengünstige und minimal-invasive Anbindung des Moduls an die bestehenden Systeme ermöglicht [106]. Die Anbindung erfolgt über die Auftragsdatenbank für das Dispositionssystem, d.h. der Transfer der vom Modul erfassten Daten erfolgt unidirektional in die Auftragsdaten-

bank, die den Simulationen mit PlaSMA zugrunde liegt.

Die Übertragung der erfassten Daten findet hier in mehreren Schritten statt. Das Hardwaremodul bereitet zuerst die zu übertragenden Daten vor dem Transfer auf, hierfür findet die XML Verwendung. Diese Auszeichnungssprache ist speziell für die strukturierte Darstellung von Informationen in Form von Textdateien konzipiert und ermöglicht einen plattformunabhängigen Austausch der so codierten Informationen innerhalb von Computernetzwerken [108].

Die XML-Datei mit den Datensätzen zu den Materialflussbewegungen wird nun über das Mobilfunknetz an den Server übertragen, auf dem das selbststeuernde Dispositionssystem betrieben wird. Für die Übertragung wird das File Transfer Protocol (FTP) genutzt, die Übernahme der Daten in die Auftragsdatenbank des Dispositionssystems wird durch ein spezielles Programm, einen sogenannten Parser, vorgenommen. Hierbei handelt es sich um ein Programm, das ein vorliegendes Dateiformat für die Weiterverwendung mit anderen Anwendungen aufbereitet [109, 110].

Abbildung 4.33 fasst die notwendigen Schritte zur technischen Integration des Hardwaremoduls zusammen. Diese konzentrieren sich auf die Konzeption der Schnittstelle für die automatisierte Datenübertragung vom Modul in die Datenbank sowie auf die Übertragungstechnik und das hierfür gewählte Protokoll.

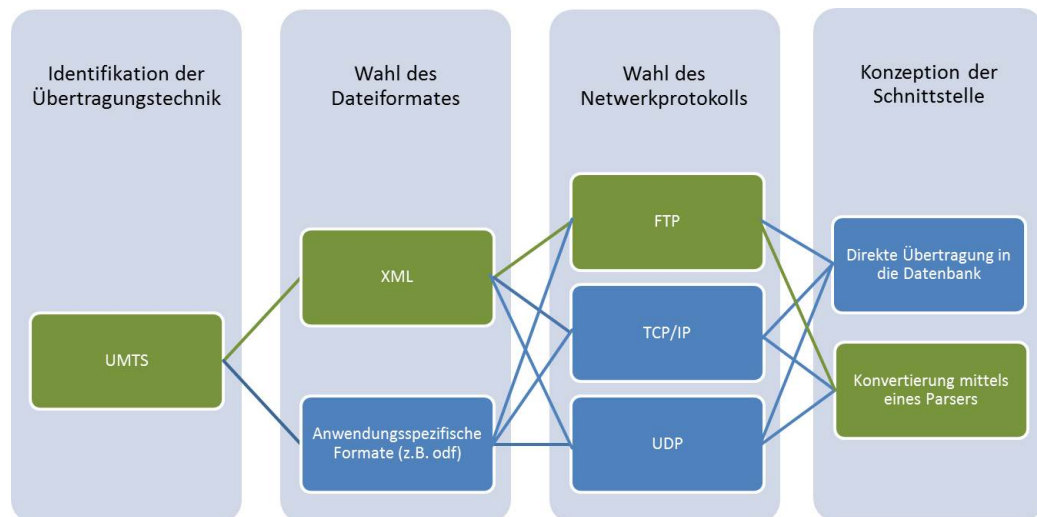


Abbildung 4.33: Vorgehen zur technischen Integration des Hardwaremoduls

Bei den Übertragungstechniken fällt die Wahl aufgrund der Reichweite und einfachen Umsetzbarkeit auf das Mobilfunknetz unter Verwendung des UMTS-Standards. Eine Umsetzung wäre technisch auch über drahtlose Nahbereichskommunikation, beispielsweise WLAN, Bluetooth oder auch Near Field Communication (NFC) möglich gewesen. Alle drei Technologien scheiden jedoch aufgrund ihrer zu geringen Reichweite aus, weiterhin kann eine ausreichende Abdeckung an den Veranstaltungsorten nicht vorausgesetzt werden.

Die Wahl des Dateiformates basiert auf der großen Verbreitung des XML-Standards in der Datenübertragung und der entsprechenden Verfügbarkeit von XML-Parsern für verschiedenste Folgeanwendungen [109]. Die Verwendung von XML reduziert somit den Implementierungsaufwand und verbessert die Wartbarkeit der gewählten Lösung. Letzteres gewährleistet auch die Möglichkeit einer zeitnahen Anpassung des Übertragungsformats an Veränderungen des Parsers und/oder der dahinter angeschlossenen Datenbank.

Die Konzeption der Schnittstelle selbst wird vom Typ der Datenbank bestimmt. Das ERP-System des Anwendungsfalles verwendet eine SQL-basierte Datenbank, so dass die Implementierung eines entsprechenden XML-Parsers keinen großen Aufwand erfordert. Dieser ist in Form eines Skriptes umgesetzt, genauere Details zur Übertragung der Informationen aus der XML-Struktur in die Datenbank finden sich im Anhang auf Seite 181.

Die Integration des Softwareparts des selbststeuernden Dispositionssystems weist eine engere Verzahnung zwischen der technischen und der prozessualen Perspektive auf, als die des Hardwareparts. Aus Sicht des Dispositionsprozesses ergänzt das System die Arbeit des Disponenten zwischen den Phasen drei und fünf der Veranstaltungsdurchführung, bzw. -planung (siehe Kapitel 4.2). Hier wird die manuelle Disposition durch den Projektverantwortlichen durch die Selbststeuernde auf Basis von PlaSMA ersetzt, wobei die Planungsergebnisse weiterhin einer Prüfung und Freigabe durch den Disponenten bedürfen. Dies ist sowohl für die Freigabe der Endergebnisse als auch bei der Autorisierung von Zumietungen der Fall. Abbildung 4.34 zeigt die prozessualen Veränderungen bei der Integration der Selbststeuerung in die Disposition.

Hier wird die selbststeuernde Disposition im Anschluss an die Grobplanung angestoßen, so dass die für die Veranstaltungsdurchführung notwendigen Detailplanungen automatisiert ausgeführt werden. Die Anzahl der Prozessschritte

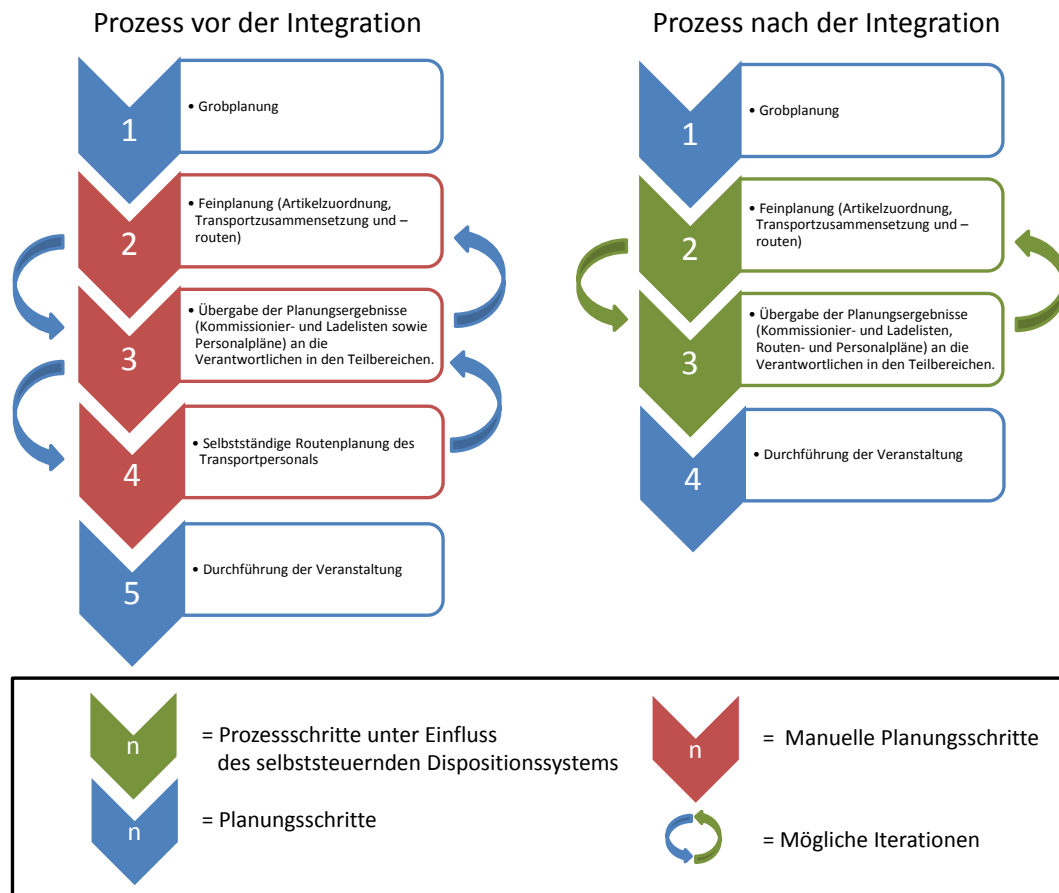


Abbildung 4.34: Prozessuale Veränderungen durch die Integration des selbststeuernden Dispositionssystems

ändert sich nicht, es entfällt lediglich die manuelle Routenplanung durch das Transportpersonal und die ggf. vor- und nachgelagerte Iteration bei Neuplanungen. Es ergeben sich jedoch einige Änderungen für den Disponenten, da die manuelle Disposition durch die automatische auf Basis der Selbststeuerung ersetzt wird. Hier verlagert sich die Tätigkeit in Richtung einer Kontrolle der erzeugten Planungsergebnisse. Das genaue Vorgehen ist weiterhin im Detail direkt von der technischen Integration des Softwareparts des Dispositionssystems abhängig [100]. Mögliche Varianten in Abhängigkeit von den Details der technischen Ausführung sind in Abbildung 4.35 zu sehen.

Der Umfang und Art des technischen Integrationsprozesses wird im Wesentlichen durch den Typ und die Anbindungsmöglichkeiten der vom ERP verwen-

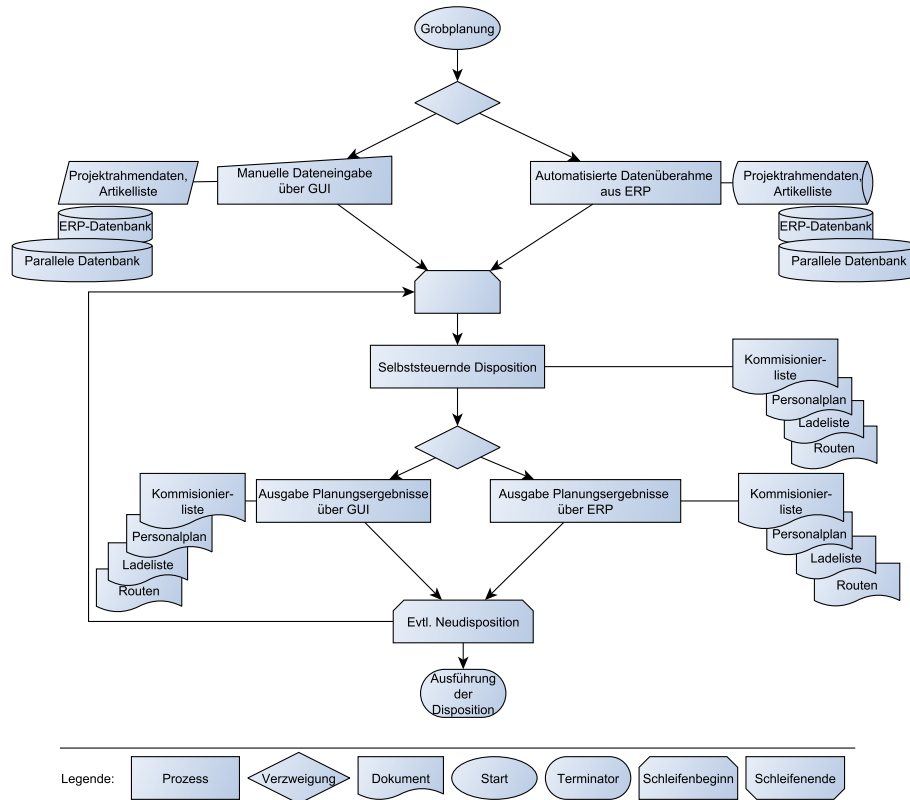


Abbildung 4.35: Vorgehen des Disponenten in Abhängigkeit von der technischen Umsetzung der Softwareintegration

deten Datenbank bestimmt. Wie im Soll-Prozess in Abschnitt 4.2 ausgeführt, kann wahlweise eine direkte Anbindung des selbststeuernden Dispositionssystems an die Datenbank des eingesetzten ERP-Systems oder der Betrieb einer parallelen Datenbank als Grundlage für PlaSMA erfolgen. Letzteres erfordert das regelmäßige duplizieren der Datenbank des ERP, bzw. einen entsprechenden Datenexport in eine Paralleldatenbank, sollte ein nicht zu PlaSMA kompatibles Format Verwendung finden [100]. Weiterhin müsste die Eingabe der für die Planung notwendigen Daten manuell über die graphische Benutzeroberfläche des selbststeuernden Distributionssystems erfolgen. Gleiches gilt für die Ausgabe der Planungsergebnisse. Ist ein direkter, bidirektionaler Datenaustausch zwischen dem ERP und dem Distributionssystem möglich, können Datenübernahme und Rückgabe der Planungsergebnisse automatisiert erfolgen. Als Zwischenlösung wäre jedoch auch eine teilweiser, bedarfsgesteuerter Export relevanter Bereiche der Datenbank denkbar.

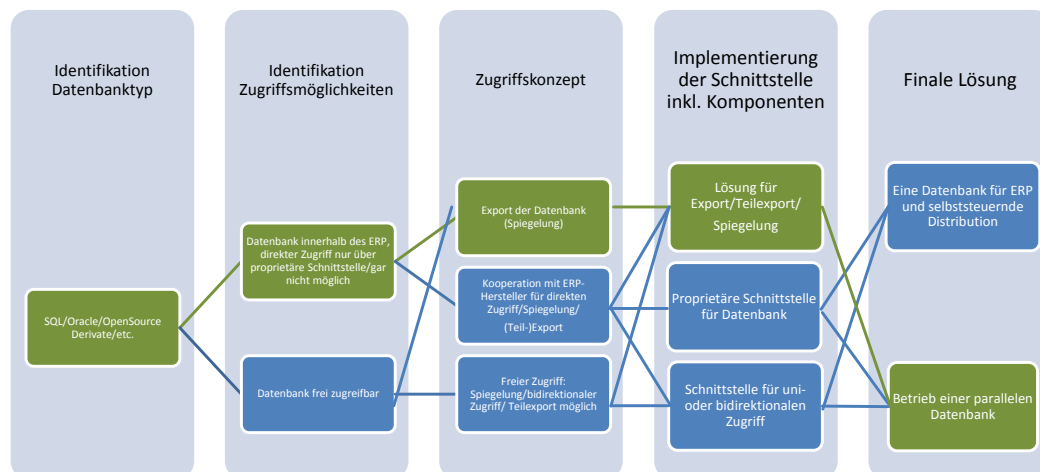


Abbildung 4.36: Vorgehen zur technischen Integration des Softwareparts

So könnten beispielsweise Änderungen im Artikelstamm und auftragsbezogene Daten ereignisgesteuert zur Verfügung gestellt werden. Das daraus resultierende Vorgehen bei der Softwareintegration im Beispielunternehmen stellt sich wie auf Abbildung 4.36 dar. Nach der Identifikation des vom ERP verwendeten Datenbanktyps wird geprüft, welche Zugriffsmöglichkeiten bestehen und ein entsprechendes Zugriffskonzept entwickelt. Auf Basis dieses Konzeptes wird die Schnittstelle inklusive der zugehörigen Komponenten, beispielsweise eines Parsers, implementiert.

Im Falle des in dieser Arbeit betrachteten Beispielunternehmens führt dieses Vorgehen zu dem Konzept eines Parallelbetriebs je einer Datenbank für das ERP-System EasyJob und das selbststeuernde Dispositionssystem [100]. Dies liegt darin begründet, dass die Schnittstellen innerhalb von EasyJob proprietären Charakters sind, d.h. es handelt sich nicht um eine quelloffene Implementierung, da der Code zur Anbindung der funktionalen Teile von Easy Job an die Datenbank urheberrechtlichen und lizenzrechtlichen Beschränkungen unterliegt. Dies schließt eine direkte Anbindung zwischen den Systemen nicht generell aus, hätte jedoch eine Beteiligung des Herstellers von EasyJob (Protonic) erfordert, die über die Dauer des vorliegenden Dissertationsvorhabens nicht vorlag. Die Gesamtarchitektur des selbststeuernden Dispositionssystems ist auf Abbildung 4.37 zu sehen.

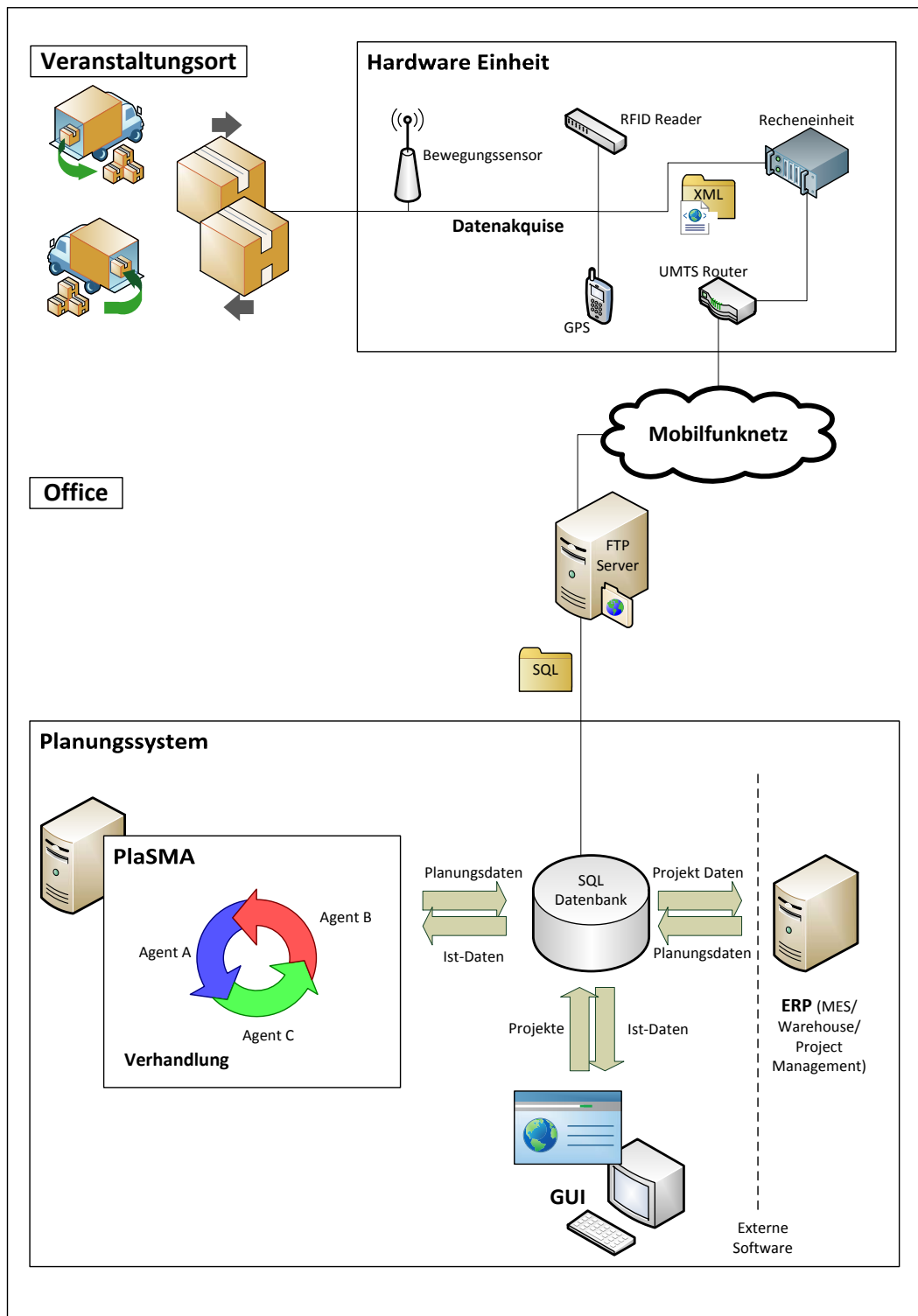


Abbildung 4.37: Gesamtarchitektur des Dispositionssystems [100]

Sie umfasst die Anbindung von n Hardwaremodulen über das Mobilfunknetz sowie den Betrieb von ERP und Dispositionssystem auf je einem Server. Hier ist, beispielsweise aus Kostengründen, auch ein Betrieb in einer virtuellen Maschine oder Parallelbetrieb von ERP und Dispositionssystem auf einem einzelnen Server möglich [100]. PlaSMA operiert auf einer eigenen Datenbank, die regelmäßig mit dem ERP-System abgeglichen wird und zusätzlich die Informationen von den Veranstaltungsorten aufnimmt. Ein- und Ausgabe der Projektdaten und Planungsergebnisse übernimmt die GUI des selbststeuernden Dispositionssystems. Entsprechend kann für das Beispielunternehmen von einer Integration des Softwareparts auf Datenebene (Data Level) gesprochen werden, da ein Austausch von ausgewählten Datensätzen zwischen parallelen Datenbanken stattfindet [106].

Zusammenfassung

Der dargelegte Entwurf eines selbststeuernden Dispositionssystems für die Veranstaltungslogistik umfasst ein Soll-Konzept, das aus den allgemeinen Gegebenheiten des Anwendungsfeldes und den spezifischen Prozessschwachstellen des Beispielunternehmens einen selbststeuernden Soll-Prozess entwickelt.

Dieser wird in ein ALEM-Modell überführt, das alle zu disponierenden Ressourcen als Objekte mit individuellen Fähigkeiten und Zielen definiert sowie das jeweils benötigte Wissen zuordnet. Zu den definierten Fähigkeiten gehört die Touren- und Routenplanung nach dem $DLRP_t$, das als Verhalten der durch Agenten in PlaSMA repräsentierten logistischen Objekte implementiert wird. Das $DLRP$ durchläuft hierbei die notwendigen technischen und methodischen Modifikationen, um das für die Veranstaltungslogistik typische Verhalten von Leihartikeln in einem dynamischen Logistiksystem abzubilden.

Die PlaSMA-Simulationsplattform wird so angepasst, dass sie automatisiert Szenarien erzeugen und verarbeiten kann, die auf der ALEM-Modellierung und einer gegebenen Auftragsituation beruhen. Weiterhin durchläuft PlaSMA die Entwicklung von einem Werkzeug zur rein vergleichenden Evaluation von Strategien und Methoden, hin zu einem Planungswerkzeug, das direkt operativ verwertbare Planungsergebnisse erzeugt und ausgibt.

Aus technischer Perspektive beinhaltet die Konzeptions- und Implementierungsarbeit die Entwicklung einer Telematikeinheit für die zeitnahe Akquise

und Bereitstellung planungsrelevanter Informationen sowie die notwendigen Programme für die Übertragung und Aufbereitung der Daten als Grundlage der selbststeuernden Disposition.

Abschließend wird eine Architektur für das Gesamtsystem entworfen und darauf aufbauend ein Vorgehen für die Integration der selbststeuernden Disposition und seiner Komponenten in die technische Infrastruktur und die Prozesse eines Unternehmens entwickelt.

Kapitel 5

Evaluation

Das folgende Kapitel betrachtet die Leistungsfähigkeit des im vorherigen Abschnitt entworfenen selbststeuernden Dispositionssystems für die Veranstaltungslogistik und seiner Komponenten. Hierzu wird das Hardwaremodul zur Informationserfassung einem Test unter Laborbedingungen unterzogen, bevor die logistische Leistungsfähigkeit des Ansatzes in Simulationsstudien näher untersucht wird. Den Abschluss bildet eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung, die basierend auf den Ergebnissen der Hard- und Softwaretests eine Abschätzung über den zu erwartenden Amortisationszeitraum bei einer praktischen Anwendung des Dispositionssystems im Beispielunternehmen trifft.

5.1 Labortests des Hardwaremoduls

Die Labortests des Hardwaremoduls zielen auf die Ermittlung der optimalen Konfiguration der Einzelkomponenten und auf die Leistungsfähigkeit des kompletten Moduls ab. Die Konfiguration bezieht sich vorrangig auf die Ausrichtung der RFID-Antenne sowie der Bewegungsmelder, um eine möglichst hohe Güte bei der Identifikation der bewegten Veranstaltungsausrüstung und der Ermittlung der Laderichtung zu erzielen [100]. Der Versuchsaufbau bildet hierbei die Bedingungen, wie sie für eine Ladesituation an einem Veranstaltungsort typisch sind, nach (vgl. Abschnitt 4.2.2) [93].

Als Transportfahrzeug wird ein LKW mit einem Gewicht von 7.5 Tonnen verwendet, wie er auch im Fuhrpark des Beispielunternehmens vorhanden ist. Die Ladegüter sind ebenfalls so ausgewählt, dass sie einer typischen Zusammenset-

zung von Veranstaltungsausrüstung für einen Auftrag entsprechen. Typische Ladegüter sind beispielsweise Rollcases für technische Geräte, Sammelbehälter für Zubehör wie Kabel oder Halterungen, Technik in Originalverpackungen sowie Paletten mit gebündelten Stückgütern (Stühle, Bänke, etc.) [100, 111]. Eine Auswahl der verwendeten Objekte ist im Anhang zu finden (Abbildung A.32 bis A.34, Seite 184 und 185). Hinsichtlich der RFID-Ausstattung wurden die beim Beispielunternehmen im Einsatz befindlichen RFID-Tags vom Typ “Raflatec Frog“ und “Rafsec G2“ verwendet, die Positionierung der Tags entspricht ebenfalls den dortigen Gegebenheiten [111]. Die Durchführung der Experimente erfolgte in sieben unterschiedlichen Szenarien, die jeweils in den verwendeten Objekten, der Art und Position der RFID-Tags und der Richtung der Heranführung an das Fahrzeug variierten (vgl. Tabelle 5.1 [100]).

Tabelle 5.1: Testsznarien für das Hardwaremodul

Szenario	Beschreibung	Wiederholungen	RFID-Ausstattung
1	Einzelnes Rollcase	je 10x Aus- und Einladen	je 10x mit Raflatec Frog/Rafsec G2
2	Mehrere Rollcases	je 10x Aus- und Einladen	je 10x mit Raflatec Frog/Rafsec G2
3	Einzelne Verpackung (Karton)	je 10x Aus- und Einladen	je 10x mit Raflatec Frog/Rafsec G2
4	Mehrere Verpackungen (Kartons)	je 10x Aus- und Einladen	je 10x mit Raflatec Frog/Rafsec G2
5	Mehrere Verpackungen in Rollcase	je 10x Aus- und Einladen	je 10x mit Raflatec Frog/Rafsec G2
6	Stapel Stühle auf Ladungsträger	je 10x Aus- und Einladen	je 10x mit Raflatec Frog/Rafsec G2
7	Materialbewegungen entlang LKW und Ladebereich	je 10x links-/rechts/vor/hinter dem Fahrzeug	je 10x mit Raflatec Frog/Rafsec G2s

Ferner werden die Testreihen für jedes Szenario mit einem leeren Ladebereich sowie mit Objekten im Fahrzeug oder im Vorfeld der Laderampe durchgeführt. Das siebte Szenario diente der Vermeidung von Falscherkennungen (False Positives) bei Materialbewegungen im Fahrzeugumfeld. Die sechs Ladeszenarien umfassen eine Wiederholung von je 10 Be- und Entladevorgängen für beide Typen von RFID-Tags. Die Position des Moduls und die generelle Ausrichtung der RFID-Antenne und der Bewegungsmelder ist auf Abbildung 5.1 zu sehen.

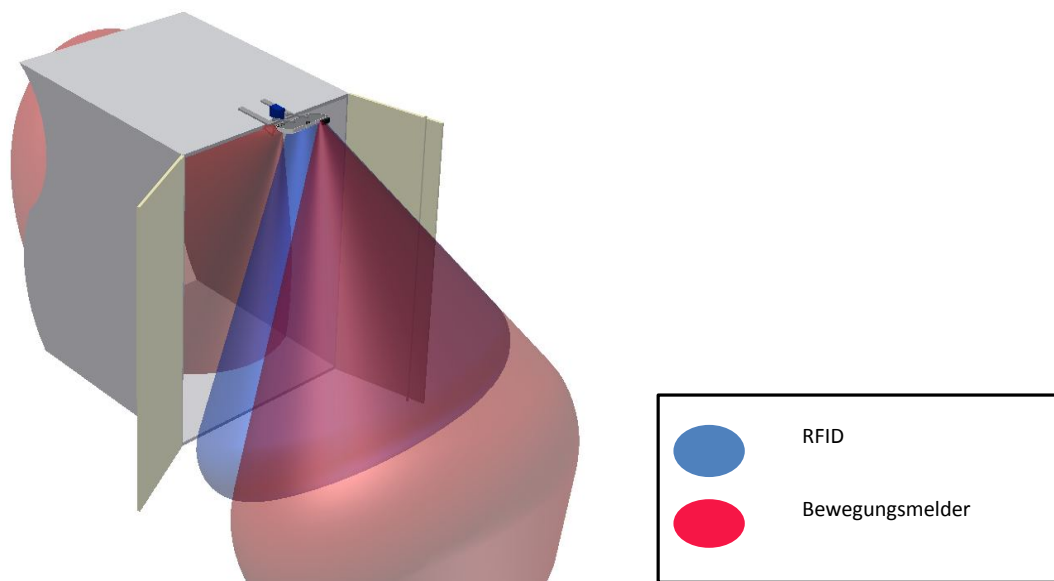


Abbildung 5.1: Ausrichtung der RFID-Antenne und der Bewegungsmelder [93, 102]

Hier betrachtet je ein Bewegungsmelder den Laderaum und die Laderampe, während die RFID-Antenne hauptsächlich auf die Laderampe ausgerichtet ist. Je nach Szenario wurden nun unterschiedliche Objekte, bzw. Anordnungen von Objekten an das Fahrzeug herangeführt und in das Fahrzeug verladen bzw. aus dem Laderaum entfernt und anschließend aus dem Versuchsbereich geführt. Die Annäherung erfolgt beispielsweise von links, rechts oder direkt in Richtung der Laderampe. Im Falle des Entladens werden die Objekte aus dem linken oder rechten Bereich des Laderaums entnommen, bzw. mittig in einer Linie mit dem Modul aus dem Fahrzeug geladen. Abbildung 5.2 zeigt eine

schematische Darstellung der Versuchsdurchführung für die Heranführung von Objekten an das Fahrzeug.

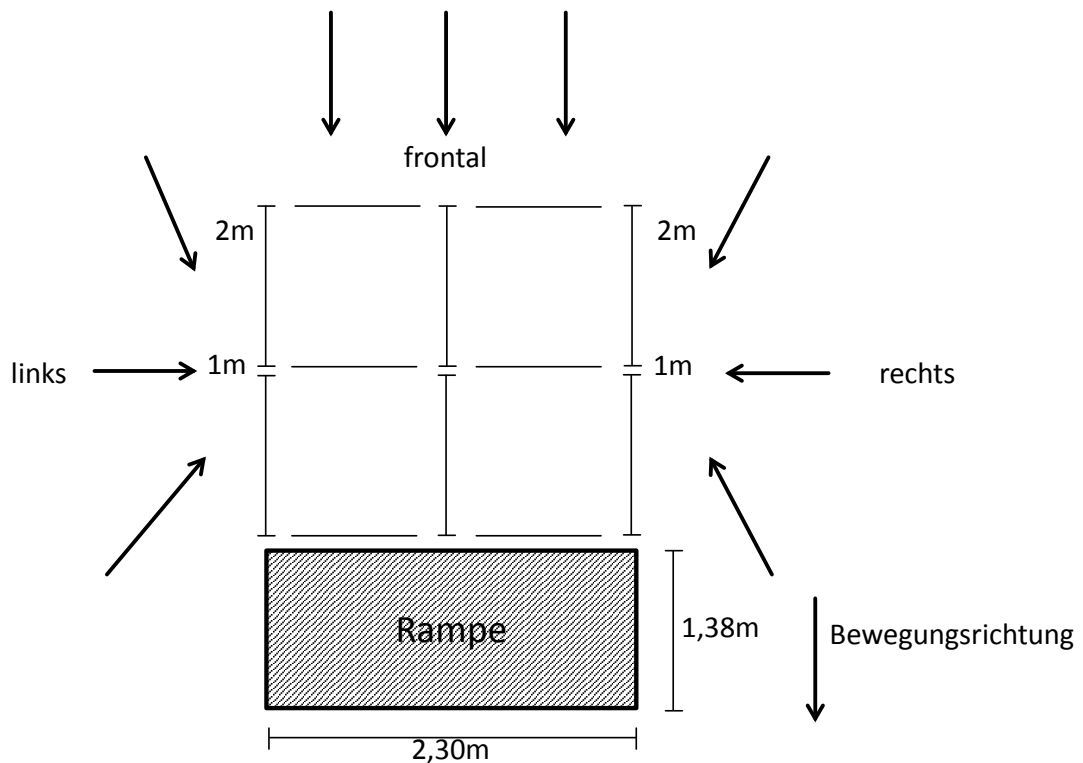


Abbildung 5.2: Schema der Versuchsdurchführung [102]

Für die Entladevorgänge wird analog verfahren. In beiden Fällen ist eine Fläche von 2x2 Metern vor und hinter der Laderampe in Sektoren zu je einem Quadratmeter unterteilt. Diese Sektoren stellen den für die Ladevorgänge relevanten Bereich dar und werden durch das Modul entsprechend abgedeckt. Bewegungen außerhalb des Bereiches sollen ignoriert werden, um Falscherkennungen zu vermeiden. Die Versuchsdurchführung für alle sechs Ladeszenarien umfasst die Heranführung der mit RFID-Tags gekennzeichneten Objekte aus verschiedenen Richtungen in das vom Modul abgedeckte Feld. Die Gesamtanzahl pro Versuchslauf liegt bei 10 Annäherungen, wobei für jedes Objekt Zeitpunkt und Ort der ersten zuverlässigen Erfassung dokumentiert wird.

Als zuverlässig wird jede Erkennung betrachtet, bei der das RFID-Tag in jedem Zyklus des Lesegerätes zuverlässig erkannt und von den Bewegungsmeldern ei-

ne Bewegung detektiert wird. Auf diese Weise werden frühzeitige Erfassungen herausgefiltert, die z.B. durch Reflexionen der elektromagnetischen Wellen an metallischen Oberflächen hervorgerufen werden. Abbildung 5.3 zeigt das Ergebnis eines Testlaufes für einen Beladeprozess, bei dem ein einzelnes Rollcase an den LKW herangeführt wird. Die zuverlässige Erkennung des RFID-Tag setzt jeweils in den Sektoren direkt vor der Laderampe (Hebebühne) ein, so dass die Abdeckung des RFID-Readers und des Bewegungsmelders inkl. der Laderampe einen Bereich von ca. 5 Quadratmetern verlässlich abdeckt.

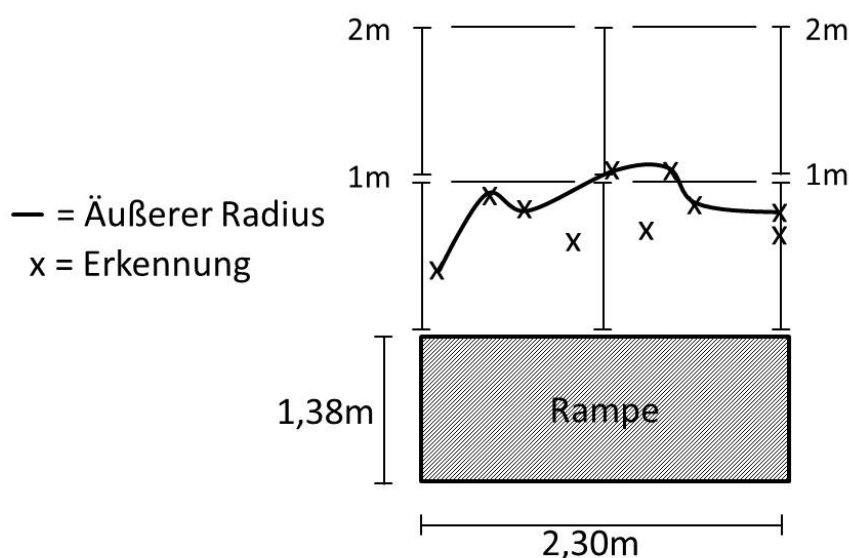


Abbildung 5.3: Testergebnis für einen Beladeprozess

Eine Wiederholung der Versuche für alle sechs Ladeszenarien ergab ähnliche Ergebnisse, wobei die Zuverlässigkeit der Erkennung in vielen Fällen davon abhing, ob sich in den erfassten Bereichen im Vorfeld des Fahrzeuges oder im Inneren weitere Objekte befanden. Diese konnten den Abdeckungsbereich verzerren. Ein Beispiel für eine solche Verzerrung ist auf Abbildung 5.4 zu sehen. Hier reduziert sich die zuverlässige RFID- und Bewegungsabdeckung, so dass beispielsweise von den Seiten in den Bereich bewegte Objekte erst auf der Rampe erkannt werden (Abbildung links) und sich der restliche Erfassungsbereich auf 50-60cm vor der Kante der Laderampe reduziert.

Diese Versuchsanordnung entspricht einer Vorkommissionierung im Erfassungsbereich. Bei dieser wird entweder vor einem Ladevorgang das zu verladende

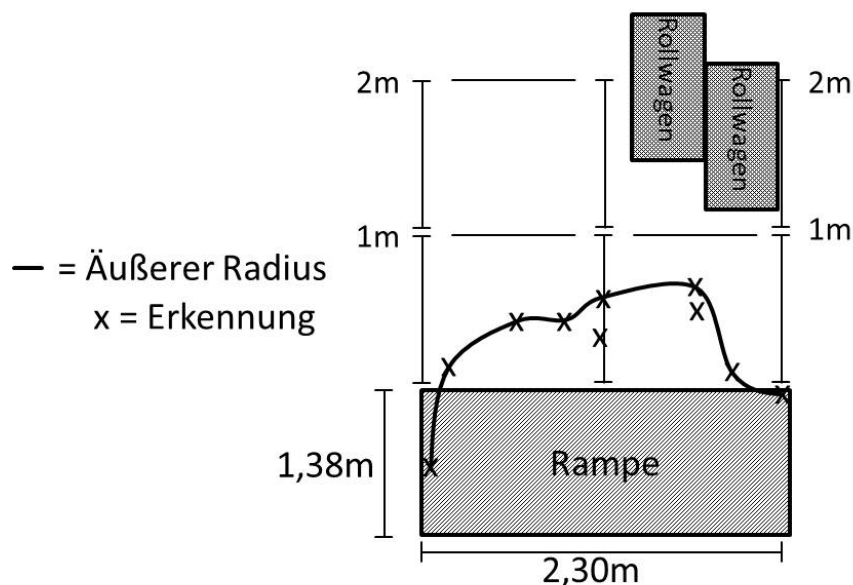


Abbildung 5.4: Testergebnis für einen Beladeprozess mit Objekten im Erfassungsbereich

Material gesammelt bereitgestellt oder nach dem Entladen für den Aufbau vorsortiert. Dies geschieht oft in räumlicher Enge, so dass zwischen bewegtem und unbewegtem Material unterschieden werden muss. Dies wird durch die technische Definition eines Ladevorganges erreicht. Dieser besteht immer aus der Erfassung eines oder mehrerer RFID-Tags und dem Auslösen beider Bewegungsmelder. Nur Objekte, die aus dem Bereich vor dem Fahrzeug in das Fahrzeuginnere (oder vice versa) bewegt werden, sind einem Ladevorgang zuzuordnen. Objekte, die im Ladebereich stehen oder sich nur vor dem Fahrzeug oder in dessen Inneren bewegen, werden ignoriert (siehe Ergänzungen im Anhang ab Seite 191).

Neben der Größe des Erfassungsbereiches ist auch die Zuverlässigkeit der RFID-Erfassung und Bewegungserkennung für die Güte der Materialflussdokumentation von Bedeutung. Die Ergebnisse in den sechs Ladeszenarien zeigten für Objekte, die mit einem Tag vom Typ Raflatec Frog ausgestattet waren, eine verlässliche Abdeckung in einem Bereich von ca. 5m^2 vor dem Laderaum (inkl. Rampe) und im Fahrzeuginneren. Tags vom Typ Rafsec G2 erzielten wesentlich schlechtere Ergebnisse, hier konnte in der Regel keine verlässliche Erkennung

erzielt werden. Tabelle 5.2 zeigt eine Übersicht der Erkennungsgenauigkeit in den sechs Ladeszenarien unter Verwendung des Tags Raflatec Frog.

Die Ergebnisse für das siebte Szenario, die Vermeidung von Falscherkennungen bei Materialbewegungen im Fahrzeugumfeld, sind ebenfalls gut. Hier wurden mit RFID-Tags versehene Objekte direkt am Fahrzeug sowie dahinter und davor vorbeigeführt. Hier konnte durch entsprechende Justierung die Anzahl der Fehlerkennungen bei Null gehalten werden.

Tabelle 5.2: Testergebnisse in den Ladeszenarien und bei der Vermeidung von Fehlerkennungen

Szenario	Lesehäufigkeit RFID		Bewegung		
	Tag Raf Frog	Ausladen	Einladen	Außen	Innen
1	10/10	10/10	10/10	10/10	10/10
2	10/10	10/10	10/10	10/10	10/10
3	10/10	10/10	10/10	10/10	10/10
4	10/10	10/10	10/10	10/10	10/10
5	10/10	10/10	10/10	10/10	9/10
6	10/10	10/10	10/10	10/10	9/10
Präzision Ladeszenarien	100%	100%	100%	100%	97%
7	0/10	0/10	0/10	0/10	0/10
Präzision Fehlerkennungen	100%	100%	100%	100%	100%

Die Evaluation der Datenaufbereitung und Übertragung fand parallel zu den Tests der Komponenten statt. Die Datensätze aus GPS-Position, Datum, Uhrzeit, erkannter Bewegungsrichtung und den Bewegungen zugeordneten Objekten wurden drahtlos (per Wireless Local Area Network (WLAN)) in eine Datenbank übertragen, die den Spezifikationen des selbststeuernden Dispositionssystems entspricht. Die Kontrolle erfolgte bei allen 260 Testläufen über eine Testversion der grafischen Oberfläche für das Dispositionssystem.

5.2 Logistische Leistungsfähigkeit

Die Leistungsfähigkeit eines logistischen Systems kann aus der Perspektive von Kosten, Leistung und Erlös betrachtet werden [112]. Hierbei werden in der Regel Kennzahlensysteme zugrunde gelegt, die Kostengrößen wie Transport-, Lager- oder Distributionskosten mit Leistungsgrößen und Erlösen in Beziehung setzen. Als Leistungsgrößen können beispielsweise Transportzeiten, Umschlagshäufigkeiten oder Liefertermintreue betrachtet werden, während Erlöse über Umsatz, Deckungsbetrag oder Gewinne definiert werden.

Hierbei sind jeweils die Größen zu betrachten, die für die strategische oder operative Ausrichtung des betrachteten Logistiksystems die größte Relevanz besitzen und somit eine möglichst direkte Bewertung der Zielerreichung ermöglichen (selektive Kennzahlen [112]). Im Hinblick auf die Veranstaltungslogistik als Anwendungsfeld des in dieser Arbeit entwickelten selbststeuernden Dispositionssystems, bietet sich eine kombinierte Betrachtung von Kennzahlen zu Kosten und Leistung als Grundlage der Evaluation an. Die Wahl fällt hierbei auf die bei der Auftragsabwicklung zurückgelegten Kilometer als primäre Kennzahl.

Die zurückgelegten Gesamtkilometer stehen in einem direkten Zusammenhang mit der Effizienz der kombinierten Zuweisung von Artikeln und Personal zu Veranstaltungen, sowie der darauf aufbauenden Touren- und Routenplanung. Die beim Transport von Verleihartikeln von und zwischen Veranstaltungsorten bewältigten Distanzen lassen somit einen direkten Rückschluss auf die Leistungsfähigkeit der selbststeuernden Disposition zu. Gleichzeitig sind die Kilometerleistungen der Transportfahrzeuge unmittelbar mit Kosten verknüpft, eine effiziente Disposition führt also direkt zu einer Reduktion der Gesamtdistanz und somit der daraus entstehenden Kosten.

Eine Betrachtung der Kapazitätsauslastung der Transportflotte im Bezug auf Volumen und Gewicht ist hingegen wenig geeignet, da diese im Wesentlichen von der heterogenen Zusammensetzung der Verleihartikel abhängt. Diese besitzen oftmals große Ausmaße bei geringem Gewicht, bzw. umgekehrt ein großes Gewicht trotz eines geringen Umfanges. So sind beispielsweise technische Geräte wie Mikrofone zwar recht leicht und klein, werden jedoch aufgrund ihrer Empfindlichkeit in entsprechenden Transportverpackungen bewegt. Diese sind

oftmals nicht ohne Weiteres stapelbar, so dass trotz eines vergleichsweise geringen Gewichtes vergleichsweise viel Raum für den Transport notwendig ist. Umgekehrt sind beispielsweise die tragenden Elemente von Bühnen (Traversen) im Vergleich zum ihrem Volumen recht schwer, da sie aus Metall gefertigt sind.

In der Leistungsbeurteilung und der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wird daher ausschließlich auf Basis der zurückgelegten Gesamt- und Mietkilometer gearbeitet. Um den genannten Eigenschaften der Verleihartikel im Rahmen der Disposition Rechnung tragen zu können, wäre eine Beladungsplanung notwendig, die sowohl die drei räumlichen Dimensionen als auch das zugehörige Gewicht berücksichtigt. Diese ist nicht Gegenstand der vorliegenden Arbeit, stellt jedoch einen zentralen Punkt zukünftiger Forschungen auf diesem Gebiet dar. Die Volumen- und Gewichtsauslastung lässt dementsprechend keine schlüssige Beurteilung der Dispositionsgüte zu.

Zusätzlich bedingt die Parametrisierung der selbststeuernden Disposition die Erfüllung von Leistungskennziffern. So werden durch das Dispositionssystem nur Lösungen ermittelt, die zuvor definierte Bedingungen, z.B. der Einhaltung von Lieferterminen, genügen und hierbei eine möglichst große Ressourceneffizienz (Auslastung der Fahrzeuge, Reduktion von Zumietungen) aufweisen. Eine Betrachtung der Gesamtdistanz in der Transportflotte ermöglicht also eine direkte Ableitung der Kosten und der sich auf dieser Basis ergebenden Erlöse. Letztere werden im Folgekapitel im Rahmen einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung genauer aufgearbeitet.

5.2.1 Szenariogrößen

Die Leistung der selbststeuernden Disposition im Hinblick auf die Reduktion der Transportkosten und die Effizienz der Ressourcenauslastung ist Gegenstand der folgenden Simulationsstudien. Diese betrachten zwei Szenarien. Das Erste umfasst Auftragssituationen, die die durchschnittlichen Gegebenheiten des Anwendungsfalles widerspiegeln. So bewegen sich die Auftragszahl, die durchschnittliche Größe und räumliche Verteilung der Veranstaltungen sowie Größe und Zusammensetzung der verfügbaren Transportflotte in Bereichen, wie sie dem in dieser Arbeit betrachteten Beispielunternehmen im Tagesge-

schäft begehen. Das zweite Szenario beschäftigt sich mit größeren Aufträgen, die in größerer räumlicher Distanz auftreten.

Diese Differenzierung ermöglicht zwei Rückschlüsse. Das erste, kleinere Szenario erlaubt eine Einschätzung der Eignung des selbststeuernden Dispositionssystems für den konkreten Praxisfall, während das zweite Szenario Aufschluss über die Skalierbarkeit des Systems gibt. Weiterhin ermöglicht die Betrachtung unterschiedlicher Szenariogrößen und -Parametrisierungen eine Abschätzung, ab wann ein Komplexitätsniveau erreicht ist, auf dem Selbststeuerungsmethoden ihre Vorteile gegenüber zentralisierten Ansätzen ausspielen können. Hier hatte sich bereits in der Vergangenheit gezeigt, dass bei der Anwendung von Selbststeuerungsmethoden Grenzen bei der Zielerreichung existieren, die vom Grad der Komplexität des betrachteten logistischen Systems abhängig sind [113]. Die Rahmenparameter für die Evaluation der logistischen Leistungsfähigkeit sind Tabelle 5.3 zu entnehmen.

Tabelle 5.3: Parameter der beiden betrachteten Szenarien

Variante	Fahrzeuge	Veranstaltungen	Artikel	Szenariodauer
1	6	5-20	30-2000	166-230 St.
2	10	25-50	65-810	219-226 St.

Die hier definierten Bedingungen werden jedem der im Folgeabschnitt aufgeführten Dispositionsansätze übergeben, so dass die Disposition auf einer identischen Datenbasis erfolgt und die Vergleichbarkeit der Resultate gewährleistet ist. Hierbei betrachtet Szenario 1 den Ist-Zustand des Beispielunternehmens. Der Fuhrpark umfasst sechs für die Disposition relevante Fahrzeuge, dies sind zwei Lieferwagen á 3,5t Nutzlast, drei Kleinlastwagen von je 7,5t und einen Lkw von 40t. Die vier vorhandenen Pkw werden für die Disposition nicht betrachtet, da sie nur für den Transport von Personal oder Kleinstmengen von Verbrauchsartikeln zum Einsatz kommen.

Mit diesem Fuhrpark sind in dem betrachteten Szenario bis zu 20 Veranstaltungen zu bedienen, die über einen Zeitraum von 10 Tagen stattfinden und jeweils zwischen 30 und 2000 Artikeln benötigen. Szenario 2 zielt auf die Bewertung der Skalierbarkeit des entwickelten selbststeuernden Ansatzes ab und

bewegt sich in entsprechend größeren Dimensionen.

So wird hier von einem größeren Fuhrpark ausgegangen, der vier Lieferwagen, fünf Kleinlastwagen und zwei Lkw umfasst. Die Anzahl der zu disponierenden Veranstaltungen liegt bei bis zu 50, ebenfalls verteilt über 10 Tage. Der jeweilige Bedarf an Veranstaltungsartikeln ist zwischen 200-810 angesetzt.

5.2.2 Referenzansätze

Ist-Zustand

Um die logistische Leistungsfähigkeit der selbststeuernden Disposition bewerten zu können, werden die erreichten Ergebnisse in beiden Szenariokategorien mit den Ergebnissen zweier alternativer Ansätze verglichen. Als erste Referenz wird der Ist-Zustand herangezogen. Dieser wird, basierend auf Experteninterviews mit Disponenten des Beispielunternehmens, durch ein Skript nachgebildet. Dieses disponiert, angelehnt an die Vorgehensweise des menschlichen Vorbildes, die Veranstaltungen nach dem First come, First served (FCFS) Prinzip. D.h., die Aufträge werden zum einen nach der Reihenfolge ihres Eintreffens disponiert, zum anderen wird jeweils die erste verfügbare und geeignete Ressource zugewiesen. So wird beispielsweise der erste Verleihartikel ausgewählt, der die Anforderungen der Grobplanung erfüllt und dann zum Transport dem ersten Transportfahrzeug zugeteilt, das die notwendigen freien Kapazitäten aufweist und dessen bisherige Ladung zu Veranstaltungen in räumlicher Nähe zu der aktuell Disponierten verbracht wird.

Zur Umsetzung des Ist-Zustands für die Ermittlung der logistischen Leistungsfähigkeit sei noch Folgendes angemerkt. Aus technischen Gründen arbeitet der Ist-Zustand in den folgenden Simulationsstudien auf derselben Datenbank, wie die selbststeuernde Disposition und das nachstehend beschriebene Simulated Annealing. Dies hat zur Folge, dass die Referenzabbildung des Ist-Zustandes bei der Disposition auf den Standort aller Artikel im logistischen Netzwerk zugreifen kann. Im Beispielunternehmen hat der menschliche Disponent nur rudimentäre Kenntnisse über Position und Zustand der außerhalb des Lagers befindlichen Ressourcen. Entsprechend dürfte die Referenz in den Simulationsstudien bessere Ergebnisse erzielen, als es in der Realität der Fall wäre. Diesem Umstand wird in der Ergebnisbeurteilung Rechnung getragen.

Simulated Annealing

Als zweite Referenz wird das sogenannte Simulated Annealing herangezogen. Dieses heuristische Optimierungsverfahren bildet das thermodynamische Geschehen beim langsamen Abkühlen (engl. Annealing) von Metallen nach [114]. Es eignet sich zur multikriteriellen Optimierung und stellt somit eine geeignete Vergleichsgröße für die integrierte Betrachtung der beiden Teilprobleme auftragsabhängige Disposition und Touren-, bzw. Routenplanung dar [115]. Eine sequentielle Betrachtung der beiden Problembereiche durch jeweils geeignete Algorithmen, z.B. die Variable Neighborhood Search (VNS), wird nicht vorgenommen, um der Bedeutung einer integrierten Betrachtung von Disposition und Routenplanung als zentralem Aspekt des entworfenen selbststeuernden Dispositionsystems Rechnung zu tragen [116].

Bereits existierende kombinierte Verfahren scheiden zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Arbeit ebenfalls aus. Sie betrachten meist die Integration von Fertigung und Logistik in produzierenden Unternehmen oder bewegen sich in anderen logistischen Fragestellungen, beispielsweise der besseren Koordination zwischen Produktionsunternehmen und Logistikdienstleistern in der Kontraktlogistik [117]. Entsprechend wird das Simulated Annealing als etablierter Ansatz betrachtet.

Dieses Verfahren ist an die Suche von Metallmolekülen nach einer Ausrichtung, die in einem möglichst energiearmen und somit stabilen Zustand des Gesamtsystems resultiert, angelehnt und wird zur Lösung von Optimierungsproblemen durch schrittweise Approximation herangezogen. Ähnlich eines Gradientenabstiegsverfahrens wird hier das globale Minimum einer Zielfunktion gesucht, in dem man sich schrittweise durch den Lösungsraum bewegt. Hierbei wird die Richtung, in dem sich das Verfahren durch den Lösungsraum bewegt, durch eine zufällige Bewegungsfunktion vorgegeben. Diese sorgt dafür, dass sich das Verfahren in Schritten abnehmender Größe durch den Lösungsraum bewegt, um diesen möglichst umfassend betrachten zu können. Um lokale Minima zu überwinden, wird für die Schritte ein Toleranzbereich festgelegt, der zwischenzeitliche Verschlechterungen der Lösung ermöglicht. Der Prozess ist abgeschlossen, wenn eine Lösung mit bestimmter Güte gefunden oder die maximale Anzahl von Schritten absolviert ist.

Die Anwendung des Simulated-Annealing auf die kombinierte Ressourcendis-

position und Routenplanung verläuft hierbei wie folgt. Alle zu disponierenden Veranstaltungen werden als eine Liste von Lieferverträgen gespeichert. Die Gesamtaufistung entspricht somit den Veranstaltungen, die der Repräsentation des Ist-Zustandes und der selbststeuernden Disposition als Grobdisposition übergeben werden. Jeder Liefervertrag an sich repräsentiert hierbei genau eine Artikelanforderung einer Veranstaltung, bestehend aus den Veranstaltungseckdaten (Ort, Start- und Endzeitpunkt), dem eingesetzten Verleihartikel, dem Fahrzeug für die Anlieferung und dem Fahrzeug für den Abtransport.

Als Startzustand wird eine zufällig generierte Disposition herangezogen. Diese stellt nicht zwangsläufig eine gültige Lösung dar, wird jedoch für die folgenden ersten Schritte der Lösungssuche als Ausgangspunkt benötigt. Die Schrittfunktion (engl. move function) vertauscht nun für einige der Veranstaltungen die eingesetzten Artikel und Fahrzeuge, so dass sich eine andere Lösung ergibt, zu der nun gesprungen werden soll. Die Entscheidung, ob der Sprung tatsächlich erfolgt, hängt hierbei jedoch von den Kosten ab, die die betreffende Lösung mit sich bringt. Um diese zu bestimmen, werden nun zunächst die Belegungspläne aller Artikel bestimmt, um Doppelbelegungen auszuschließen. Ergibt sich eine Doppelbelegung, so stellt die gefundene Permutation der Artikelzuweisungen keine gültige Lösung dar und der Sprung wird abgebrochen. Ist dies nicht der Fall, werden im Folgeschritt für jedes Fahrzeug der Transportflotte die zugehörigen Verträge gesammelt und nach Auftragszeitpunkt sortiert.

Aus dieser Aggregation ergeben sich die potentiellen Routenpunkte des Fahrzeuges. Aus der Liste der Routenpunkte werden nun die Kosten der Route bestimmt die Summe aller Routenkosten ergibt, analog zum Verfahren der selbststeuernden Disposition (vgl. Kapitel 4.5), die Gesamtkosten der betrachteten Lösung. Diese Kosten beziffern nun die Güte der Lösung und entscheiden darüber, ob der entsprechende Schritt vollzogen wird. Die Annahmewahrscheinlichkeit für eine neue Lösung wird hierbei durch folgende Funktion bestimmt:

$$f(T, x) = \begin{cases} e^{\frac{-x}{T}}, & \text{für } x > 0 \\ 1, & \text{für } x \leq 0 \end{cases} \quad (5.1)$$

mit

T = Temperatur

x = Kosten der neuen Lösung - Kosten der alten (vorherigen) Lösung

Hierbei liegt die Wahrscheinlichkeit für die Annahme einer besseren Lösung bei 1, so dass diese in jedem Fall angenommen wird, und die Wahrscheinlichkeit für die Annahme einer schlechteren Lösung bei $e^{\frac{-x}{T}}$.

5.2.3 Experimentelle Ergebnisse

Auf Grundlage der in Abschnitt 5.2.1 definierten generellen Rahmenparameter werden nun Simulationsstudien durchgeführt. Diesen liegen verschiedene Settings zugrunde, die sich jeweils in der Anzahl der Veranstaltungen, der angeforderten Artikel und dem betrachteten Zeitraum unterscheiden. Die Settings werden je 10x simuliert, um die für heuristischen Ansätze typischen Schwankungen des Simulated Annealing herauszufiltern und über die Summe der Durchläufe einen aussagekräftigen Mittelwert der erreichten Lösungen zu erreichen. Die Ergebnisse des Ist-Zustandes und der selbststeuernden Disposition verändern sich hierbei nicht, da es sich um deterministische Verfahren handelt. Eine Ausnahme bildet hierbei die Laufzeit des selbststeuernden Ansatzes, hier ergeben sich durch Abweichungen im Verlauf der Verhandlungen in der Agentensimulation ggf. Unterschiede in den Laufzeiten.

Szenario 1, fünf Veranstaltungen

Tabelle 5.4 zeigt die Parameter der betrachteten Settings für Szenario 1. Hier werden die Veranstaltungen schrittweise von fünf auf 20 erhöht, die betrachteten Zeiträume zwischen dem Beginn der ersten und der letzten zu disponierenden Veranstaltung bewegen sich zwischen 200 und 230 Stunden und die Zahl der angeforderten Artikel liegt zwischen 30 und 2000.

Die Zusammensetzung der Artikel ist hierbei zufallsbestimmt, die Anforderungen der Veranstaltungen werden aus dem Gesamtbestand des Beispielsun-

Tabelle 5.4: Parameter der Settings für Szenario 1

Veranstaltungen	Zeitraum	Artikel
5	201/205 St.	30-1000
10	171/227/229 St.	45-2000
15	166/200 St.	52-3000
20	198/230 St.	65-2000

ternehmens zusammengestellt, was eine den Realbedingungen entsprechende heterogene Artikelmenge erzeugt. Diese beinhaltet gleichermaßen Artikel mit geringem und großem Gewicht, bzw. Volumen, so dass sich auch für geringe Artikelanzahlen in Abhängigkeit von den anderen Parametern eine komplexe Disposition ergibt. Für die detaillierte Betrachtung in diesem Kapitel werden Settings mit fünf und 20 Veranstaltungen herangezogen, beginnend mit zwei Settings mit jeweils fünf Veranstaltungen. Für die Ergebnisse der anderen Settings wird auf den Anhang ab Seite 193 verwiesen.

Die erzielten Ergebnisse des ersten Settings sind auf Abbildung 5.5 zu sehen. Der Fokus der Betrachtung liegt hierbei auf den Kennzahlen zurückgelegte Kilometer (Gesamtkilometer) und Mietkilometer als Gradmesser für die Güte der Dispositionsleistung. Für das erste betrachtete Setting ermitteln alle Ansätze eine Dispositionslösung, ohne auf Mietfahrzeuge zurückgreifen zu müssen. Die zurückgelegten Kilometer liegen in allen Simulationsläufen bei 246km für die selbststeuernde Disposition und bei 255km für den Ist-Zustand und das Simulated Annealing.

Das heuristische Verfahren ist, ausgehend von der gegebenen Initiallösung nicht in der Lage, innerhalb der vorgegebenen Schrittzahlen eine bessere Lösung als der Ist-Zustand zu ermitteln. Die Differenz zwischen den disponierten Gesamtkilometern der drei Ansätze liegt in dem effizienteren Nutzung der Fahrzeuge mit 7,5t Nutzlast durch die Selbststeuernde Disposition. Diese veranschlagt für die Bedienung der fünf Veranstaltungen nur 234 statt 243km. Für die Lieferwagen mit 3,5t wird von allen Ansätzen eine Strecke von ca. 12 Kilometern vorgesehen, so dass der Vorsprung der selbststeuernden Disposition auf die ef-

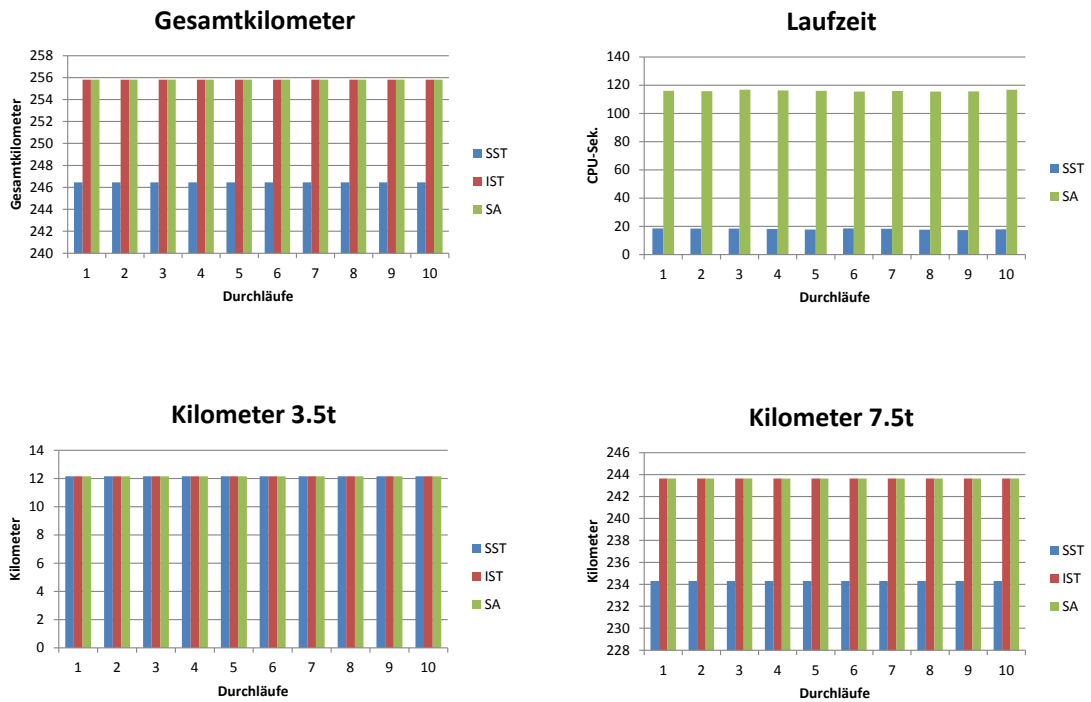


Abbildung 5.5: Ergebnisse des ersten Settings mit fünf Veranstaltungen in Szenario 1

fizientere Routenplanung für die Kleinlastwagen zurückzuführen ist. Neben den Gesamt- und Mietkilometern spielt auch die Laufzeit der Disposition eine Rolle für die praktische Anwendung, denn sie bestimmt die Reaktionsfähigkeit auf dynamische Ereignisse. Um angemessen auf diese reagieren und bei Bedarf zeitnah eine Neudisposition durchführen zu können, darf die Laufzeit der Ansätze bestimmte Grenzen nicht überschreiten. Bisher wird die Disposition im Praxisfall durch einen Experten vorgenommen, der für die Planung, je nach Art, Anzahl und Umfang der Veranstaltungen, zwischen 1-2 Stunden benötigt. Hierbei wird in der Regel aus Komplexitätsgründen keine komplette Neudisposition vorgenommen, sondern auf Basis der bereits erfolgten Planungen neu disponiert. Auf diesem Wege kommt eine sequentielle Disposition zustande, die die in den vorigen Kapiteln bereits ausgeführten Schwächen aufweist.

Die Laufzeit in der Simulationsstudie bewegt sich zwischen einer und 116 CPU-Sekunden pro Durchlauf. Hierbei ist zu beachten, dass der Ist-Zustand zwar

die Vorgehensweise des menschlichen Disponenten nachahmt, jedoch durch die rechnergestützte Durchführung erheblich schneller zu einem Ergebnis kommt. Daher ist für den Vergleich mit den anderen Ansätzen von der Zeit auszugehen, die der menschliche Experte benötigt hätte. Der Ist-Zustand benötigt ca. eine CPU-Sekunde für das betrachtete Setting, was wie bereits erläutert, 1-2 Stunden in der Realität entspricht (um die Darstellung zu vereinfachen, wird diese Laufzeit in der Grafik nicht dargestellt). Der selbststeuernde Dispositionsansatz liegt bei durchschnittlich ca. 18 CPU-Sekunden, was auf die zahlreichen, wechselseitigen Verhandlungen innerhalb des Multiagentensystems PlaSMA zurückzuführen ist. Das Simulated Annealing liegt schließlich zwischen 115 und 116 Sekunden. Hierbei sei angemerkt, dass die maximale Anzahl der Schritte für die Heuristik auf 10.000.000 beschränkt wurde. Die Laufzeit ist entsprechend von der Schrittzahl abhängig. Die gewählte Parametrisierung basiert auf vorherigen Simulationsstudien zur Ermittlung eines guten Verhältnisses zwischen Schrittzahl und erzielter Lösungsgüte.

Im Hinblick auf die Laufzeiten erreichen alle drei Ansätze praxistaugliche Werte, das Simulated Annealing und die Selbststeuernde Disposition stellen jedoch deutliche Verbesserung der Laufzeit dar. Zusätzlich ist die Güte der errechneten Lösung für die selbststeuernde Disposition wesentlich höher einzuschätzen. Die aufzuwendende Rechenzeit ist, abgesehen von der Parametrisierung der einzelnen Algorithmen, auch von der Komplexität des jeweiligen Szenarios abhängig. Diese wird durch die Anzahl der Veranstaltungen und Verleihartikel sowie durch die Kapazität der Transportflotte beeinflusst. Zusätzlich spielen die zeitlichen und räumlichen Abhängigkeiten eine entscheidende Rolle.

Die zu betrachtenden Abhängigkeiten liegen für das erste betrachtete Basissetting bei 34, wobei in diese Summe alle zu erfüllenden Bedingungen einfließen. Dies sind terminliche Anforderungen, wie die Start- und Endzeiten der Veranstaltungen und Kapazitätsgrenzen hinsichtlich der Transportmittel oder Arbeitszeiten. Hinzu kommen Bedingungen hinsichtlich der Zugehörigkeit von Komponenten zu Artikeln. Die Anzahl der zu berücksichtigenden Bedingungen erhöht sich generell mit der Anzahl der Veranstaltungen und der Gesamtmenge der zu bewegenden Artikel. Bei besonderen Konstellationen können jedoch auch bei großen Artikelanzahlen nur wenige Bedingungen vorliegen. Das zweite Setting mit fünf Veranstaltungen soll hier als Beispiel dienen (Abbildung 5.6).

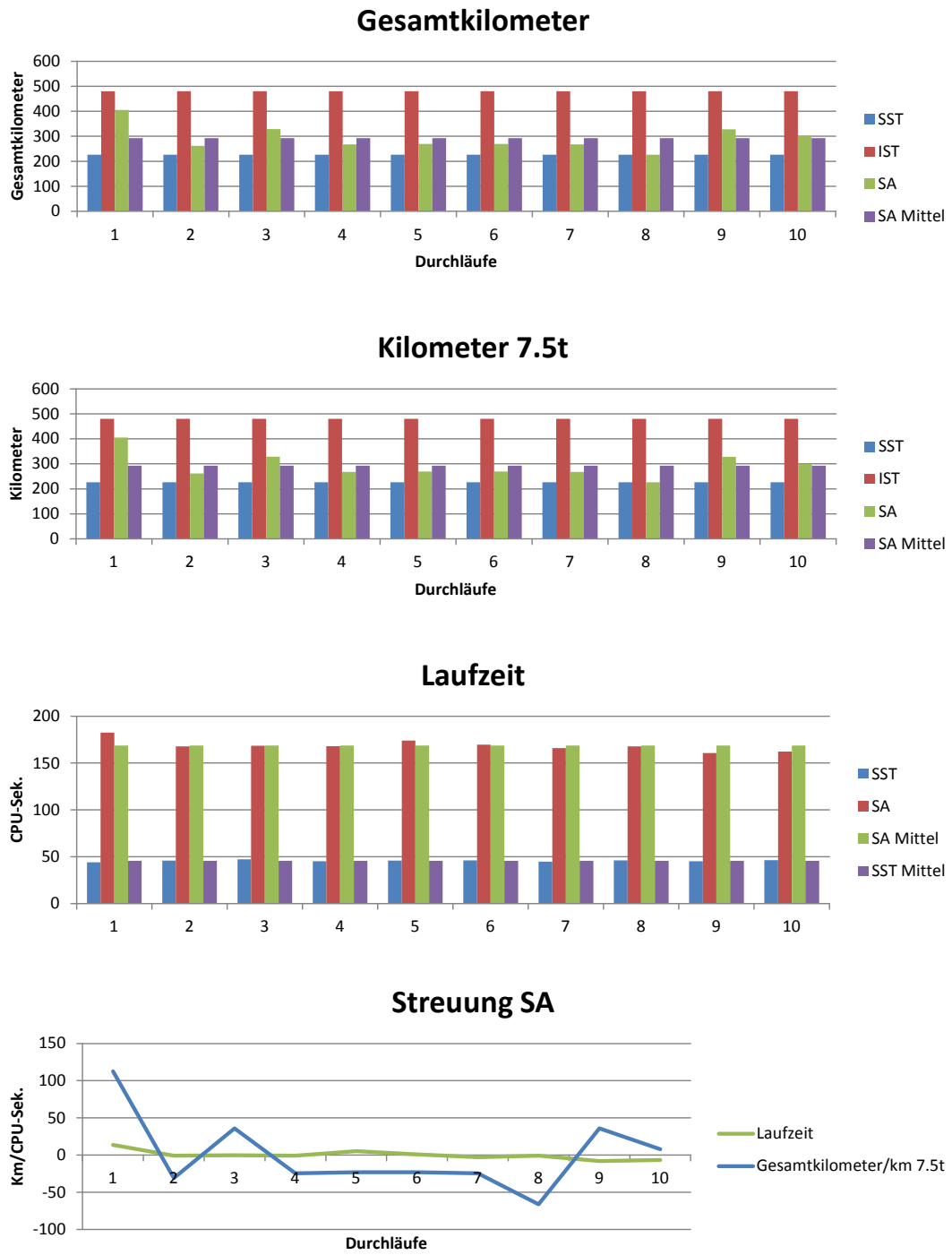


Abbildung 5.6: Ergebnisse des zweiten Settings mit fünf Veranstaltungen in Szenario 1

Dieses weist, trotz 500 angeforderter Artikel für fünf Veranstaltungen, nur 27 Bedingungen auf. Dies liegt darin begründet, dass es sich zum Großteil um Artikel handelt, die nur aus einem Stück, bzw. einer Transportbox bestehen und daher keine zusätzlichen Bedingungen hinsichtlich des Transportes mehrerer Komponenten mit sich bringen. Wie die Ergebnisse zeigen, ergeben sich trotzdem einige Unterschiede hinsichtlich des Laufzeitverhaltens der drei Ansätze. So steigt die Laufzeit der selbststeuernden Disposition auf 44 bis 46 CPU-Sekunden, die des Simulated Annealing auf 160 bis 182 CPU-Sekunden. Hierbei bestätigt sich, dass innerhalb der Agentensimulation durch unterschiedliche Verhandlungsverläufe, trotz identischer Ergebnisse hinsichtlich der Disposition, Varianzen in der Laufzeit auftreten können. Der Mittelwert für die Laufzeit liegt hier bei 45 CPU-Sekunden, für das Simulated Annealing beträgt die durchschnittliche Dispositionsdauer 168 CPU-Sekunden. Dabei streut das Simulated Annealing mit einer Spannweite von 22 CPU-Sekunden, der absolute Mittelwert der Streuung liegt über die 10 Durchläufe bei ca. vier CPU-Sekunden. Die Güte der Disposition, gemessen an den Gesamtkilometern, zeigt wie im ersten Basissetting einen deutlichen Vorsprung für den selbststeuernden Ansatz. Er ist in der Lage, die Routenlänge auf 226km zu reduzieren, die IST-Disposition liegt dagegen bei ca. 480km, das Simulated Annealing im Mittel bei 292km. Im besten Fall (Durchlauf 8) erreicht die Heuristik jedoch mit 226km die Güte der selbststeuernden Disposition, während der schlechteste Wert bei 405km liegt. Die Spannweite der Streuung erreicht hier 179km, der zugehörige absolute Mittelwert ist mit ca. 38.5km zu beziffern. Zu den Ergebnissen ist weiterhin anzumerken, dass alle Veranstaltungen mit den drei verfügbaren Kleinlastwagen (7.5t) bedient werden können, so dass die Gesamtkilometer und die Kilometerwerte der entsprechenden Fahrzeugkategorie, inkl. der Streuung, identisch sind. Weiterhin werden für die Disposition der jeweils fünf Veranstaltungen keine Mietfahrzeuge benötigt.

Szenario 1, zwanzig Veranstaltungen

Die beiden vorigen Settings mit je fünf Veranstaltungen stellen im Hinblick auf das Tagesgeschäft des Beispielunternehmens eine untere Schranke dar, während das Maximum der gleichzeitig zu disponierenden Veranstaltungen bei ca. 20 liegt. Die folgenden beiden Settings zeigen die Ergebnisse der drei Ansätze für diese Kategorie.

Das selbststeuernde Dispositionssystem setzt hierbei die Tendenz zu guten Leistungen fort (Abbildung 5.7) und ist in der Lage, die Disposition ohne Zuhilfenahme von Mietfahrzeugen vorzunehmen. Der eigene Fuhrpark legt hierbei 870km zurück, während der Ist-Zustand und das Simulated Annealing unter Verwendung von Mietfahrzeugen auf eine Gesamtlänge von 1328, bzw. 1169km für alle Touren kommen. Das Simulated Annealing liegt hier zwischen 1115 und 1251km, was einer Streuung von bis zu 136km bei einer mittleren absoluten Streuung von 59,5km entspricht. Die Inanspruchnahme von Mietfahrzeugen liegt zwischen 12,5km für den IST-Zustand und durchschnittlich vier Kilometern für das Simulated Annealing.

Wie bei den kleineren Settings zeigt sich, dass die verfügbare Schrittzahl das Simulated Annealing in einigen Durchläufen daran hindert, eine Verbesserung zu erreichen. Über alle Durchläufe betrachtet benötigt die Heuristik jedoch ca. acht Mietkilometer weniger als der Ist-Zustand, in der Hälfte der Simulation gelingt ihr eine Disposition allein auf Basis des eigenen Fuhrparks.

Die Verteilung auf die einzelnen Fahrzeugkategorien zeigt weitere Unterschiede zwischen den Ansätzen auf. Während die selbststeuernde Disposition und das Simulated Annealing alle drei Fahrzeugkategorien nutzen, setzt die Ist-Lösung mit Priorität auf Fahrzeuge mit 3.5t und 7.5t. Dies ist durch die Vorgehensweise des Ist-Ansatzes nach dem Prinzip First come-First served begründet. Hier wird, falls möglich, zuerst jedes Fahrzeug der, im Bezug auf die Kosten pro Kilometer, günstigsten Fahrzeugkategorie gefüllt, bevor in die nächsthöhere Kategorie gesprungen wird. Dies führt zu einer Disposition, die alle Lieferwagen und Kleinlastwagen auslastet, bevor der Lkw mit 40t befüllt wird. Aus der Kostenperspektive ist dies ungünstig, da der Einsatz aller Kleinfahrzeuge anstatt des LKW mehr Fahrpersonal erfordert und entsprechende Kosten verursacht.

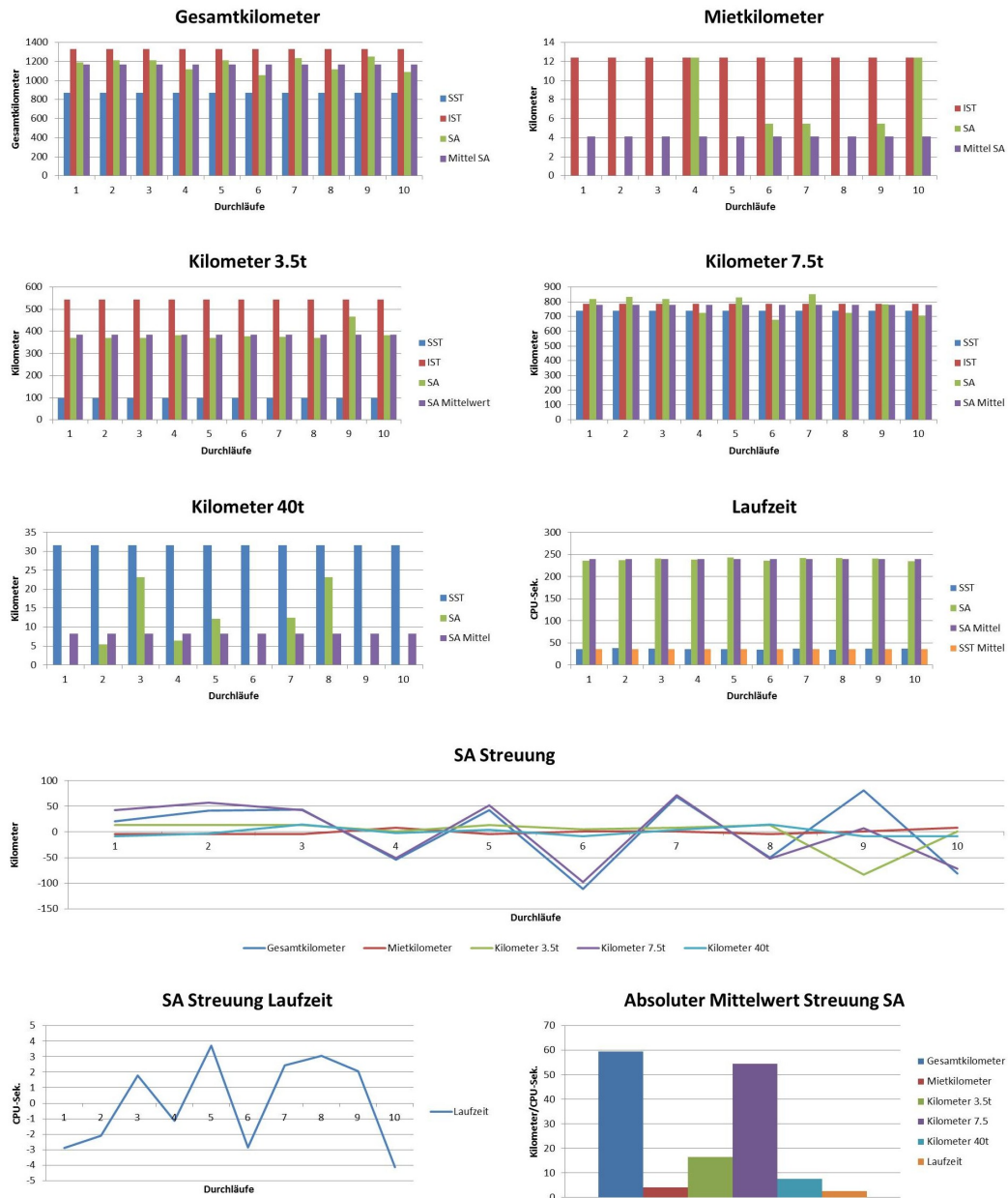


Abbildung 5.7: Ergebnisse des ersten Settings mit 20 Veranstaltungen in Szenario 1

Das Simulated Annealing wählt hier einen Mittelweg, der ausgehend von der Ist-Lösung als Initialzustand Artikel auf die anderen Fahrzeugklassen umdisponiert, jedoch aufgrund der Laufzeit-, bzw. Schrittbegrenzung nicht die Güte der selbststeuernden Disposition erreicht.

Die für die Lösung des Settings benötigte Laufzeit liegt zwischen durchschnitt-

lich 36 Sekunden für die selbststeuernde Disposition und 239 Sekunden für das Simulated Annealing. Die Abweichungen für die selbststeuernde Lösung aufgrund variierender Verhandlungsverläufe der involvierten Agenten führt hierbei zu einer Laufzeit zwischen 34,5 bis 38,3 Sekunden. Das Simulated Annealing streut hierbei um maximal acht Sekunden, im Mittel liegt die Abweichung bei 2,62 Sekunden, während sich die Extremwerte bei 235 und 242 Sekunden bewegen.

Insgesamt betrachtet, sind alle Ansätze in der Lage, das erste Setting mit 20 Veranstaltungen zu lösen, jedoch zeigen sich aufgrund der Komplexität erste Unterschiede in Laufzeit und Dispositionsgüte. Das zweite Setting mit dieser Größenordnung in Szenario 1 zeigt eine Fortsetzung der Tendenz, die mit der Zunahme der zuzuweisenden Artikelmenge einhergeht. Die Resultate der entsprechenden Simulationsstudie auf Abbildung 5.8 und 5.9 zeigen erneut einen klaren Vorsprung der selbststeuernden Disposition im Hinblick auf die benötigten Gesamtkilometer. Hier erreicht der selbststeuernde Ansatz eine Distanz von 825km, während der Ist-Zustand auf 1390km und das Simulated Annealing auf durchschnittlich 1502km kommen.

Der letztere Ansatz streut hierbei bis zu 429km zwischen Extremwerten von 1261km bzw. 1691km. Der absolute Mittelwert der Streuung liegt bei 120km. Die den ermittelten Gesamtdistanzen zugrundeliegende Verteilung der Touren auf die Fahrzeugklassen zeigt dem vorigen Setting ähnliche Tendenzen auf. Die selbststeuernde Disposition konzentriert sich auf die Kleinlastwagen mit 7.5t, während Ist-Zustand und Simulated Annealing vorrangig die 3.5- und 7.5-Tonner belegen. Dies ist erneut auf das Vorgehen des Ist-Zustandes zurückzuführen, bei der Disposition zuerst die Lieferwagen gefolgt von den beiden größeren Fahrzeugklassen zu disponieren. So werden diese Kategorien vom Ist-Zustand vollständig belegt, während die selbststeuernde Disposition in Kombination mit einer effizienteren Routenführung beide Fahrzeugklassen weniger auslastet. Das Simulated Annealing weicht schließlich im Rahmen seiner Möglichkeiten von der Lösung des Ist-Zustands ab, verbleibt jedoch bei einer zusätzlichen Nutzung des Lkw mit 40t.

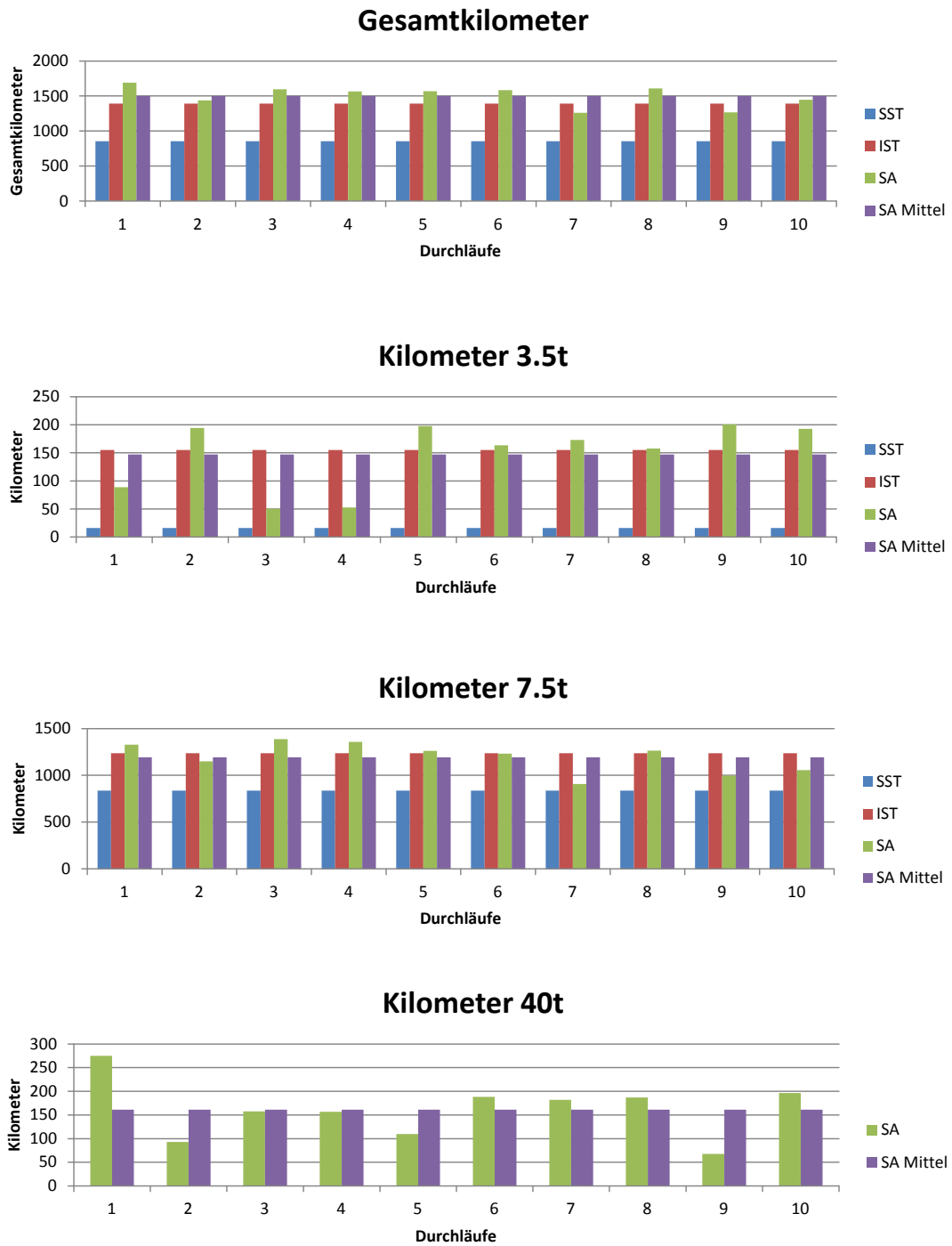


Abbildung 5.8: Teil 1 der Ergebnisse des zweiten Settings mit 20 Veranstaltungen in Szenario 1

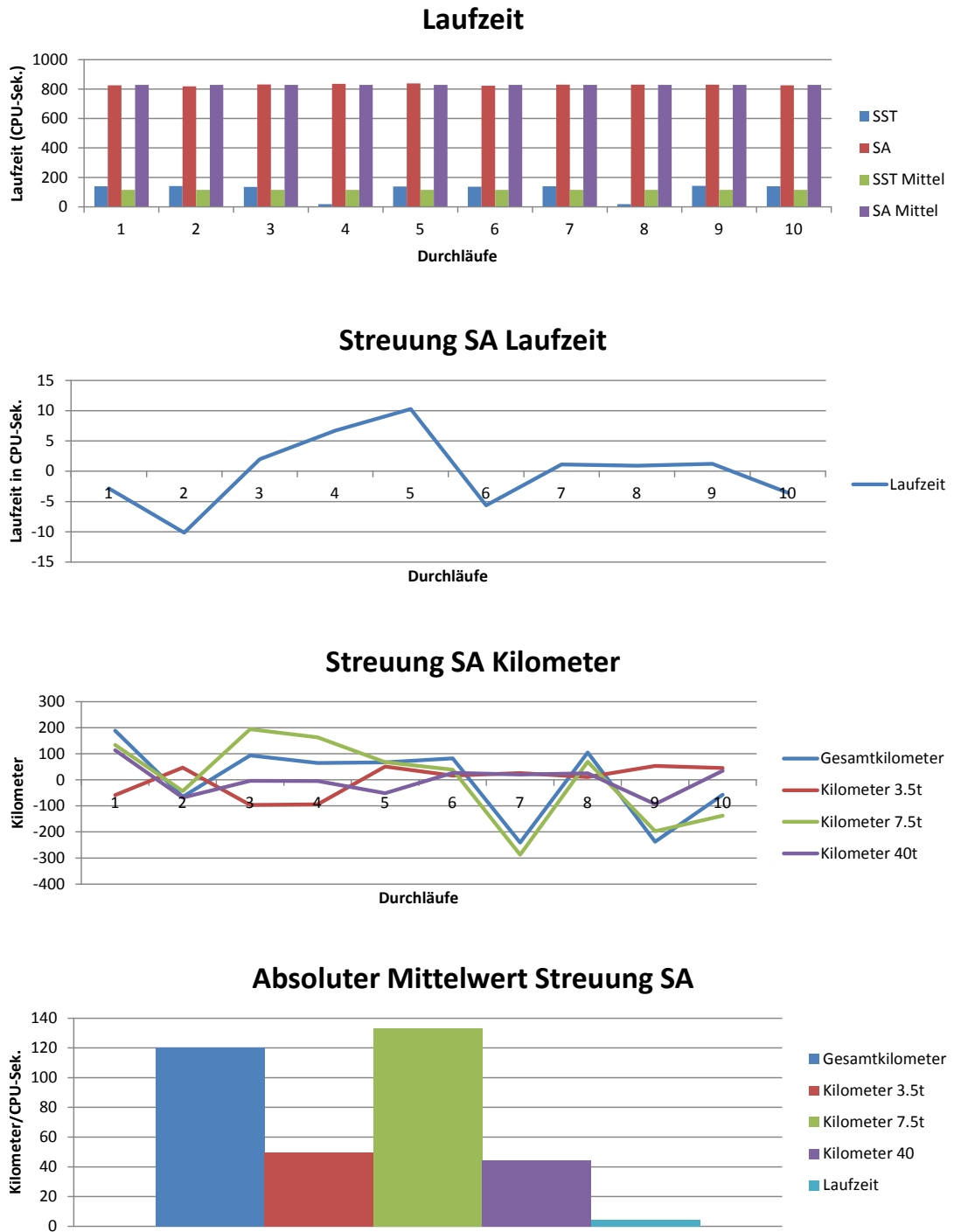


Abbildung 5.9: Teil 2 der Ergebnisse des zweiten Settings mit 20 Veranstaltungen in Szenario 1

Bei der Laufzeit zeigen sich bei der selbststeuernden Disposition erneut Schwankungen, hier werden im Schnitt 115 CPU-Sek. benötigt, wobei die Extremwerte bei 18 und 19 Sekunden in den Durchläufen vier und acht sowie bei 142 und 140,6 Sekunden in den Durchläufen zwei und neun liegen. Das Simulated Annealing benötigt im Schnitt 829 Sekunden, bei einer durchschnittlichen Streuung von 4,5 Sekunden und Maximalwerten zwischen 818 und 839 Sekunden. Die Streuung des Simulated Annealing ist für die Gesamtkilometer und die Kilometerdistanz der 7.5t-Fahrzeuge mit 120 und 133 Sekunden am größten, wobei die Schwankungen direkt voneinander abhängen. Die Belegung des Lkw mit 40t und der Lieferwagen á 3.5t variiert mit 50 und 44 Sekunden annähernd gleich, während die Laufzeit mit 4,5 Sekunden am geringsten streut.

Auswertung Szenario 1

Die Simulationsstudien zu Szenario 1 zeigen, dass alle drei Ansätze in der Lage sind, die Disposition für 5-20 Veranstaltungen vorzunehmen. Hierbei greifen, im Gegensatz zur selbststeuernden Disposition, Ist-Zustand und Simulated Annealing in einem Fall auf Mietfahrzeuge zurück. Generell ist die Lösungsgüte für die selbststeuernde Disposition am höchsten anzusetzen.

Der selbststeuernde Ansatz benötigt in keinem der betrachteten Settings Mietfahrzeuge und erfüllt die gegebenen Aufträge mit der geringsten Gesamtdistanz für die Fahrzeugflotte, was auf eine vergleichsweise bessere Routenplanung der Transporte hinweist. Weiterhin benötigt die selbststeuernde Disposition weniger Fahrzeuge, da bei Bedarf auf den Lkw zurückgegriffen wird, anstatt die Liefer- und Kleinlastwagen vollständig auszulasten, was Personalaufwand und -kosten reduziert.

Der Laufzeitvergleich zeigt ebenfalls einen Vorsprung für die selbststeuernde Disposition. Diese schließt in allen betrachteten Settings die Disposition am schnellsten ab. Da hierbei der Ist-Zustand mit minimal einer Stunde Realzeit anzusetzen ist und das Simulated Annealing auf mehrere Durchläufe zur Mittelwertbildung angewiesen ist, dürfte die selbststeuernde Disposition die beste Reaktionsfähigkeit auf dynamische Ereignisse besitzen.

Abschließend ist noch zu berücksichtigen, dass der Ist-Zustand in den Simulationsstudien auf Ressourcen zugreifen kann, über die der Disponent in der Real-situation des Beispielunternehmens nur unzureichende Informationen vorliegen

hätte. Entsprechend sind für den Ist-Zustand weitere Abstriche hinsichtlich der Lösungsgüte einzukalkulieren.

Szenario 2, 25 Veranstaltungen

Tabelle 5.5 zeigt die Parameter der betrachteten Settings für Szenario 2. Hier werden die Veranstaltungen schrittweise von 25 auf 50 erhöht, die betrachteten Zeiträume zwischen dem Beginn der ersten und der letzten zu disponierenden Veranstaltung bewegen sich zwischen 219 und 240 Stunden und die Zahl der angeforderten Artikel liegt zwischen 70 und 800.

Tabelle 5.5: Parameter der Settings für Szenario 2

Veranstaltungen	Zeitraum	Artikel
25	227/224 St.	200-800
30	219/230 St.	90-810
35	228/240 St.	70-690
40	230/240 St.	120-800
45	229/230 St.	165-800
50	227/226 St.	200-810

Die gewählten Parameter entsprechen den angenommenen Rahmenbedingungen für ein größeres Unternehmen im Veranstaltungsmanagement, das über mehr Artikel und einen größeren Fuhrpark verfügt. Auch hier werden jeweils zwei Settings der unteren und oberen Schranke betrachtet. Die an dieser Stelle aus Platzgründen nicht explizit dargestellten Ergebnisse finden sich im Anhang ab Seite 193.

Den Anfang der Betrachtung stellt ein Setting mit 25 Veranstaltungen dar, die verteilt über einen Zeitraum von 227 Stunden liegen und einen Bedarf von 200 Veranstaltungsartikeln besitzen. Die Resultate der Simulationsstudie mit den drei bekannten Ansätzen sind auf den Abbildung 5.10 und 5.11 dargestellt.

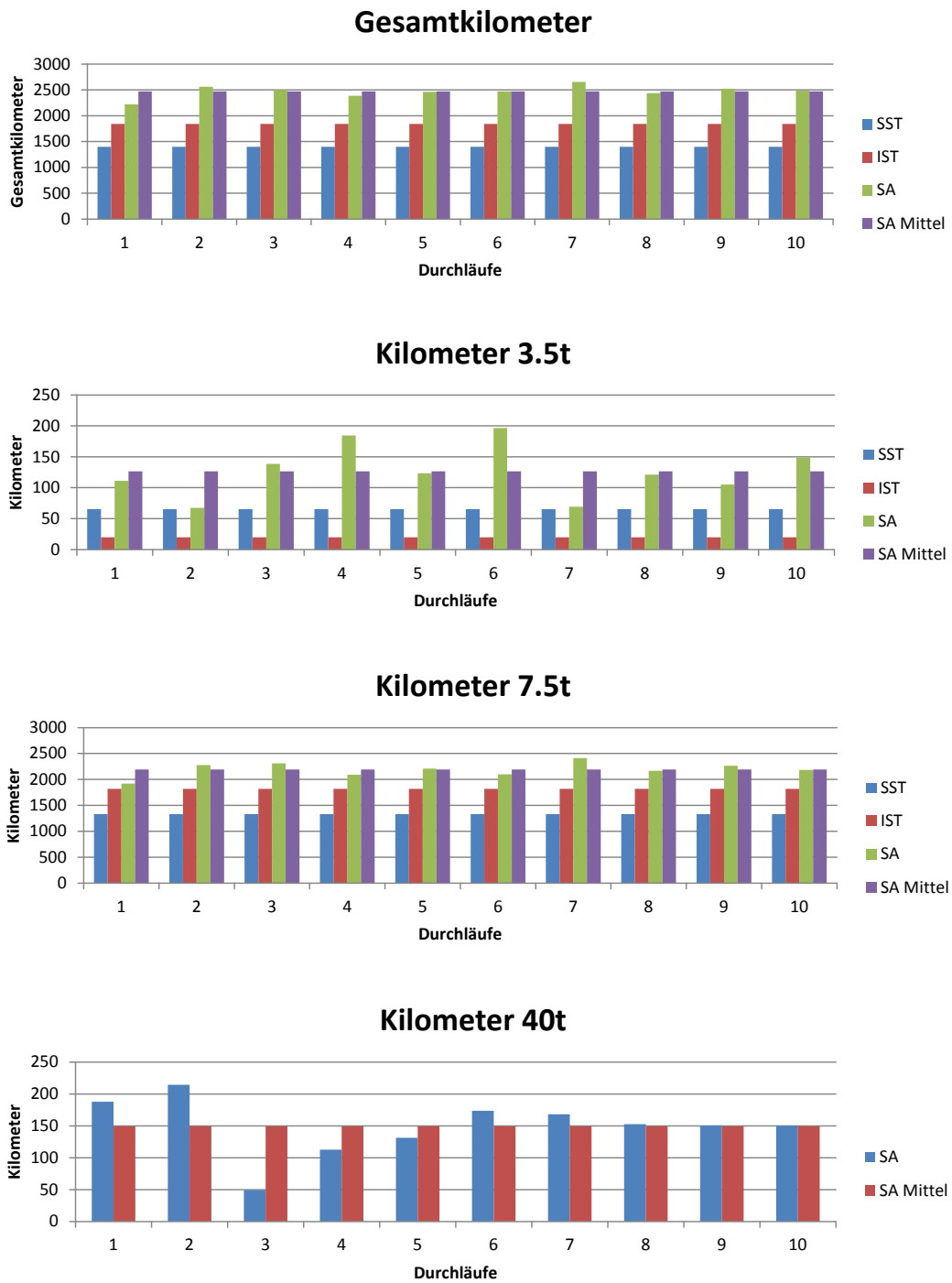


Abbildung 5.10: Teil 1 der Ergebnisse des ersten Settings mit 25 Veranstaltungen in Szenario 1

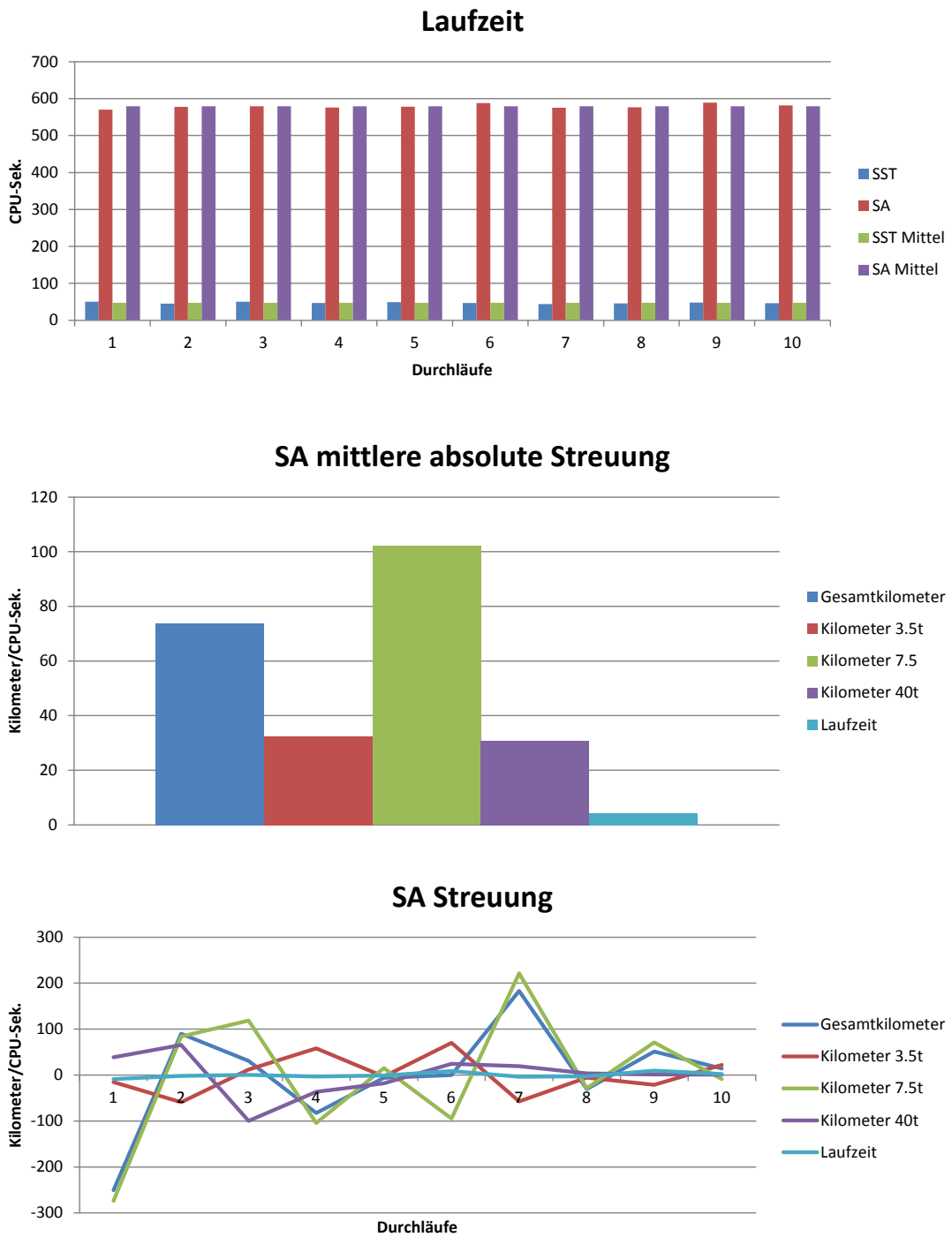


Abbildung 5.11: Teil 2 der Ergebnisse des ersten Settings mit 25 Veranstaltungen in Szenario 1

Die benötigte Gesamtdistanz für das Setting bewegt sich zwischen 1398 km für die selbststeuernde Disposition und 2469km für das Simulated Annealing während der Ist-Zustand bei 1839km liegt.

Die Laufzeit der Simulation beträgt für die selbststeuernde Disposition zwischen 44 und 50 CPU-Sekunden, der Schnitt liegt hier bei 47,4 Sekunden. Das Simulated Annealing streut über die 10 Durchläufe um durchschnittlich vier Sekunden, die Extremwerte liegen bei 570, bzw. 588 Sekunden.

Die Verteilung auf die Fahrzeugkategorien zeigt Tendenzen ähnlich den Experimenten in Szenario 1 auf. Das Simulated Annealing nutzt, ausgehend von der Lösung des Ist-Zustandes, als einzige der drei Ansätze die Lkw mit 40t. Selbststeuernde Disposition und Ist-Zustand konzentrieren sich auf die Fahrzeuge mit 3,5t und 7,5t, wobei der erstere Ansatz seinen Vorteil bei der Gesamtdistanz durch die effizientere Routenführung für die Kleinlastwagen (7,5t) erreicht.

Die Streuung des Simulated Annealing konzentriert sich, ebenfalls ähnlich zu den Settings aus Szenario 1, mit 74 und 102km vorrangig auf die Gesamtdistanz und die Kilometerleistung der Kleinlastwagen. Die Streuung für die Lieferwagen und die Lkw liegt mit 32 und 30km deutlich darunter und fast gleichauf. Die Ursache dieser Entwicklung ist wie in den vorangegangenen Simulationen in der Schrittmenge für das Simulated Annealing zu suchen, diese reicht nicht aus, um sich ausreichend von der zufälligen Initiallösung zu entfernen.

Im zweiten Setting mit 25 Veranstaltungen liegt die selbststeuernde Disposition bei den Gesamtkilometern erneut deutlich unter den beiden anderen Ansätzen (vgl. Abbildung 5.12 und 5.13). Sie benötigt insgesamt 1111km, während der Ist-Zustand 2124km veranschlagt und das Simulated Annealing auf 5631km kommt. Das Simulated Annealing streut hierbei um durchschnittlich 233km, zwischen Extremwerten von 5264 und 6017km. Die Laufzeit der drei Ansätze liegt zwischen 395 CPU-Sekunden für die selbststeuernde Disposition und 1977 Sekunden für das Simulated Annealing. Hierbei streuen beide Ansätze, die Verhandlungsdauer der selbststeuernden Disposition bewegt sich zwischen 386 und 402 CPU-Sekunden, die Streuung der Heuristik erreicht ein Mittel von acht Sekunden zwischen Ausschlägen von 1962 und 1990 Sekunden.

Die Verteilung auf die Fahrzeugklassen zeigt eine Konzentration auf die Liefer- und Kleinlastwagen beim Ist-Zustand und der selbststeuernden Disposition, während das Simulated Annealing als einziger Ansatz auf Lkw zurückgreift.

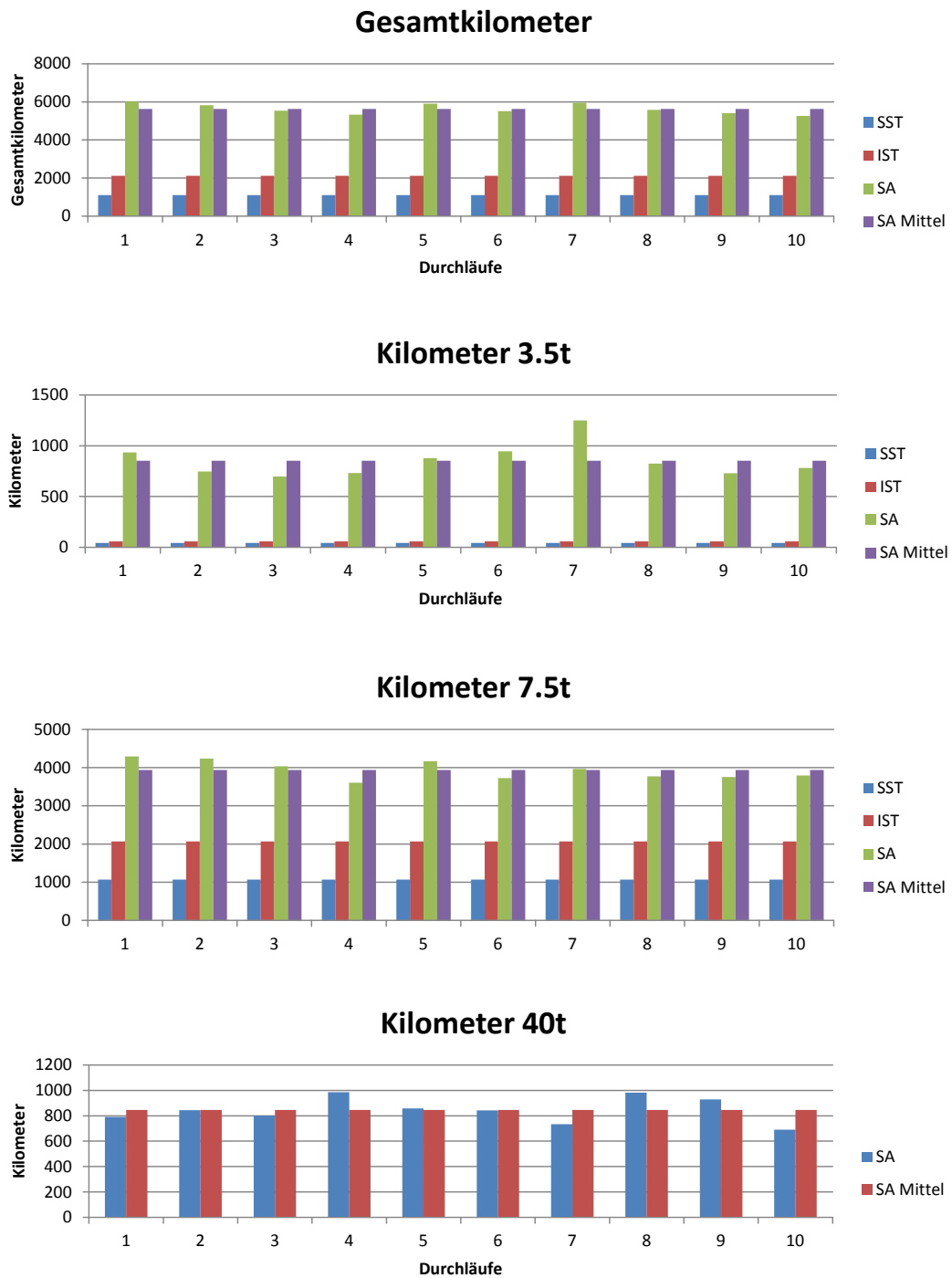


Abbildung 5.12: Erster Teil der Ergebnisse des zweiten Settings mit 25 Veranstaltungen in Szenario 2

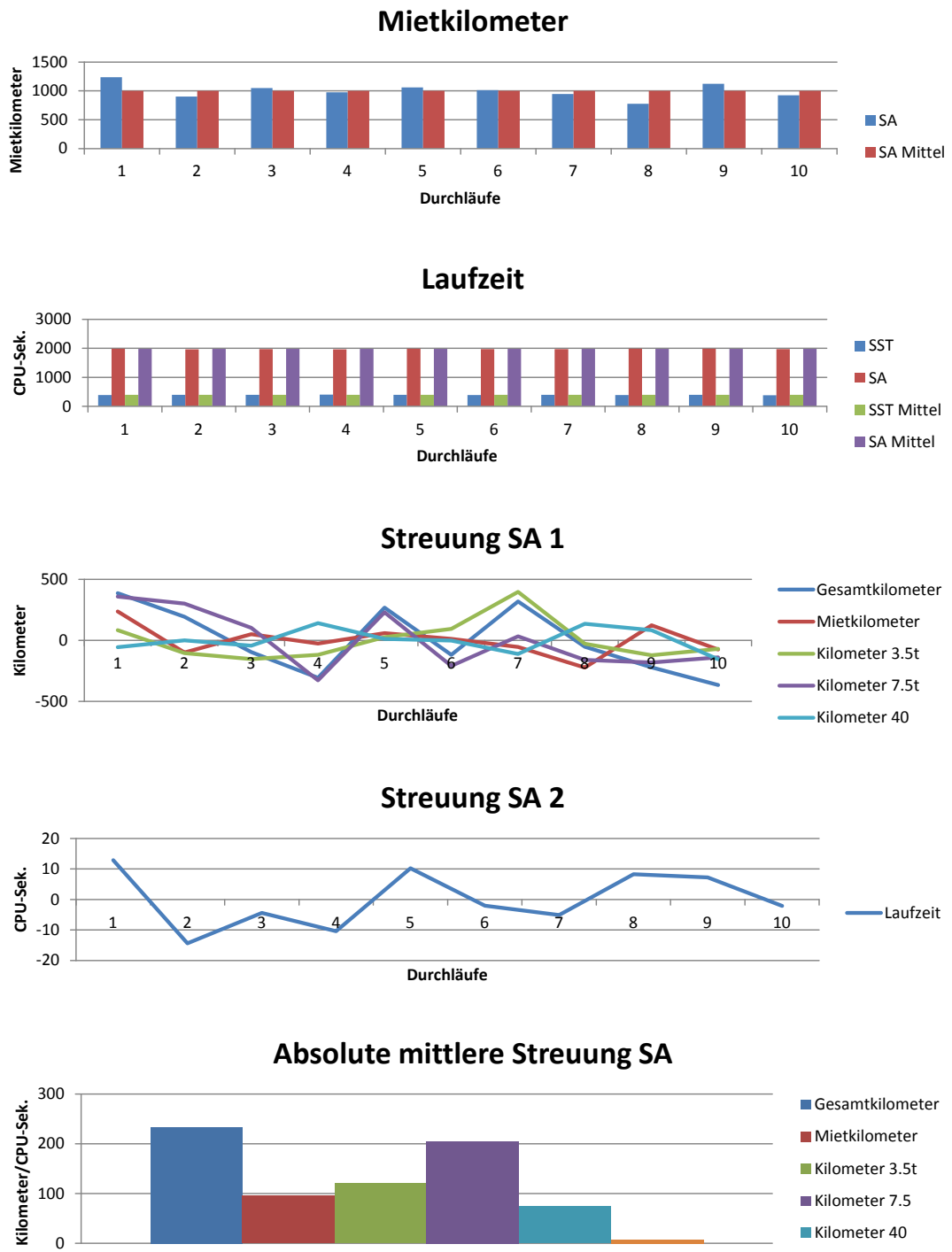


Abbildung 5.13: Zweiter Teil der Ergebnisse des zweiten Settings mit 25 Veranstaltungen in Szenario 2

Generell liegt die Auslastung für die Heuristik sehr hoch, hier wird in der gegebenen Schrittzahl keine schlüssige Verteilung erreicht, so dass neben dem Einsatz der Lkw zusätzliche Mietkilometer anfallen. Die Anmietungen belaufen sich auf durchschnittlich 96 Kilometer, die Extremwerte liegen bei einer Strecke von 11, bzw. 236 Kilometer.

Im Hinblick auf die Streuung des Simulated Annealing sind Werte zwischen 96 Kilometer bei der Gesamtdistanz und ca. acht Sekunden bei der Laufzeit zu verzeichnen. Insgesamt zeigen die Ergebnisse der beiden Settings mit 25 Veranstaltungen, dass alle Ansätze in der Lage sind, die betreffenden Aufträge zu disponieren. Berücksichtigt man die Einschränkungen des Ist-Zustandes und des Simulated Annealing hinsichtlich der Laufzeit und der hierbei erreichten Güte der Disposition, so ist auch in diesem Parameterbereich die selbststeuernde Disposition als überlegen anzusehen. Sie benötigt eine deutlich geringere Laufzeit und zeigt klare Vorteile bei der Touren- und Routenplanung auf, die sich in einer geringeren Gesamtdistanz der Fahrzeugflotte äußert. Weiterhin muss die selbststeuernde Disposition in keiner der betrachteten Settings auf Mietfahrzeuge zurückgreifen.

Szenario 2, 50 Veranstaltungen

Die beiden Settings mit 50 Veranstaltungen bilden die obere Schranke, die für ein größeres Unternehmen angenommen wird. Die Ergebnisse des ersten Settings sind auf Abbildung 5.14 und 5.15 aufgeführt. Es zeigt sich, dass ein Anwachsen der Veranstaltungsanzahl innerhalb des betrachteten Zeitraums auf 50 zu einer weiteren Verbesserung für die selbststeuernde Disposition führt.

So ist der Ansatz in der Lage, die 50 Veranstaltungen auf Touren mit einer Gesamtlänge von 1296km zu bedienen, während der Ist-Zustand hierfür 3551km benötigt und das Simulated Annealing sogar bei durchschnittlich 9449km liegt. Die Laufzeit liegt hierbei bei durchschnittlich 170 Sekunden, wohingegen das Simulated Annealing zwischen 1259 und 1324 Sekunden benötigt. Die Streuung der Heuristik bewegt sich im Mittel zwischen 1,4km für die Mietkilometer und 636km für die zurückgelegte Gesamtdistanz.

Die Aufteilung auf die Fahrzeugklassen zeigt eine gleichmäßige Verteilung durch die selbststeuernde Disposition, Ist-Zustand und Simulated Annealing konzentrieren sich wie gehabt auf die Lieferwagen und Klein-Lkw.

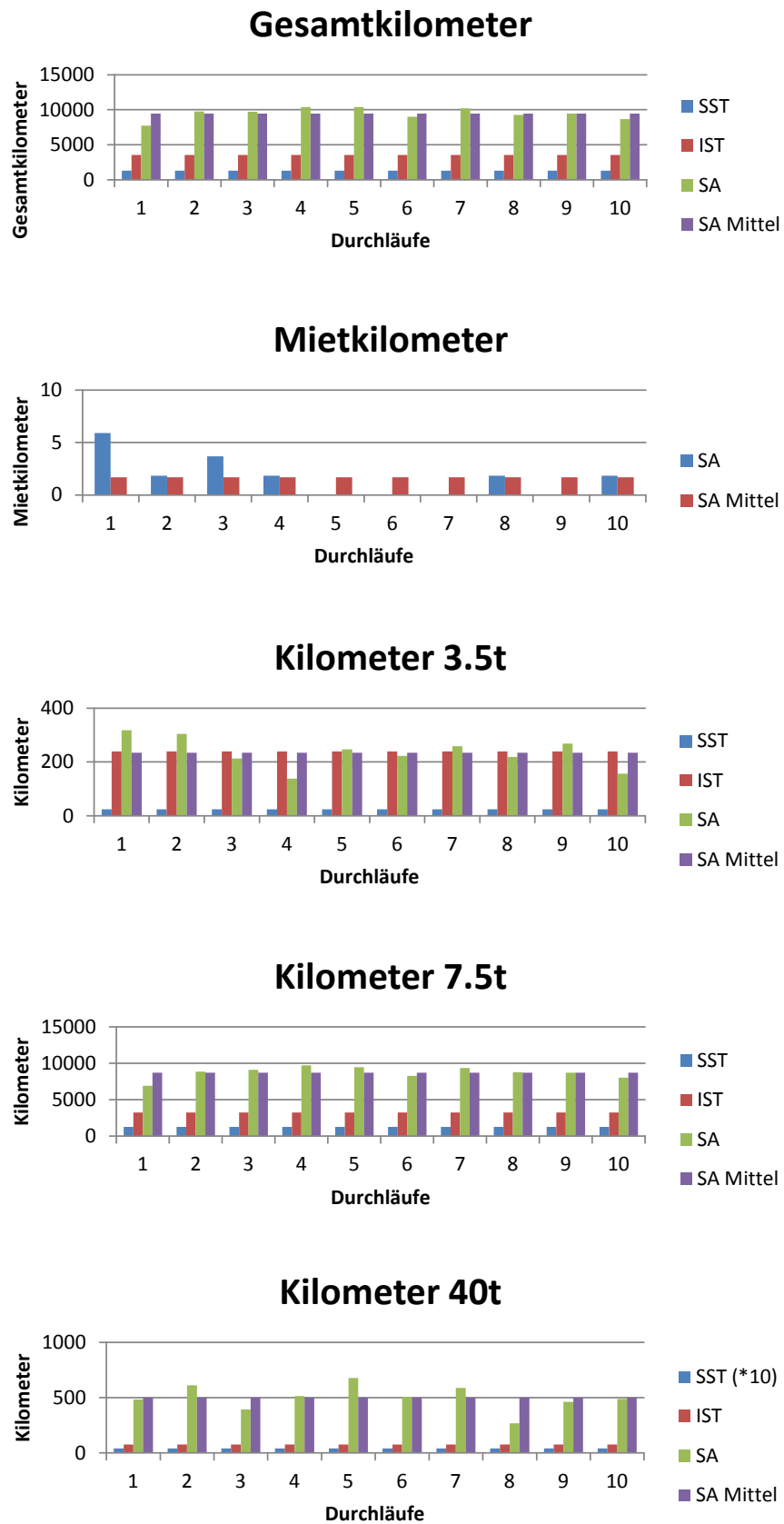


Abbildung 5.14: Teil 1 der Ergebnisse des ersten Settings mit 50 Veranstaltungen in Szenario 2

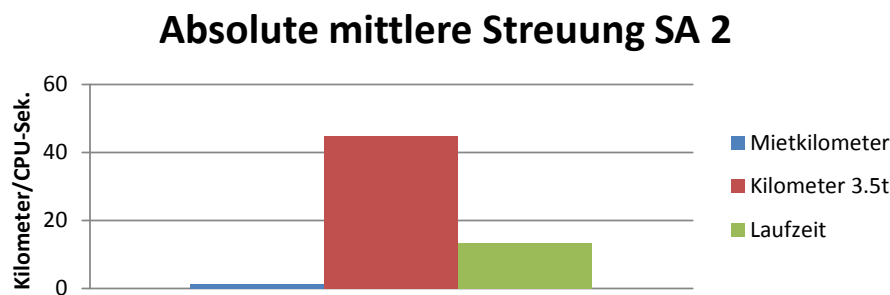
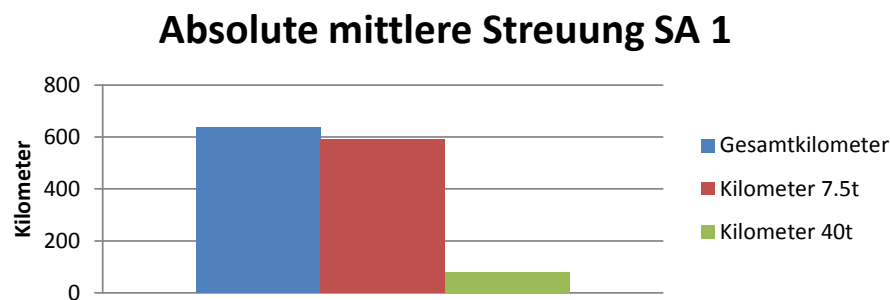
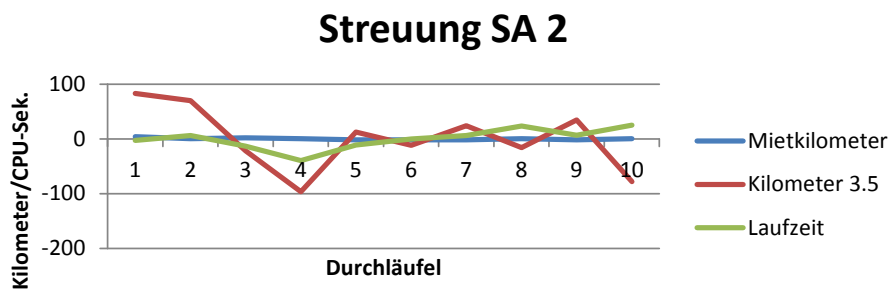
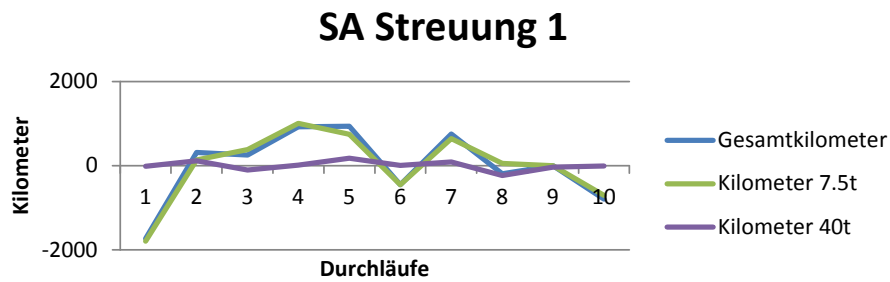
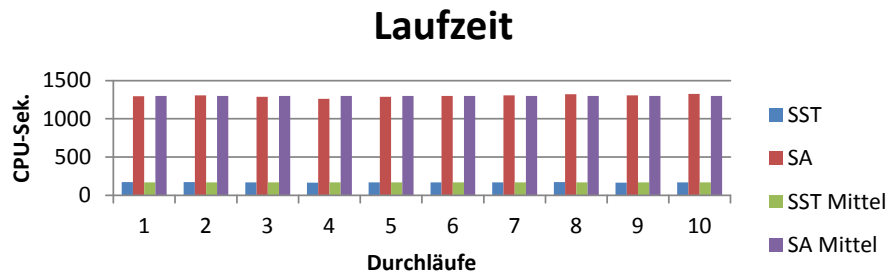


Abbildung 5.15: Teil 2 der Ergebnisse des ersten Settings mit 50 Veranstaltungen in Szenario 2

Die Artikelzusammensetzung für die 50 Veranstaltungen führt jedoch im Gegensatz zu den vorher betrachteten Settings zu einer geringfügigen Nutzung der LKW durch alle Ansätze. Hier haben alle Dispositionsansätze mind. eine Zwischenstation durch ein Fahrzeug mit 40t bedient, was auf eine hohe Auslastung für die Gesamtflotte hinweist, die nur durch Nutzung der teuersten Fahrzeugklasse zu bewältigen ist.

Das zweite Setting mit 50 Veranstaltungen weist eine höhere Anzahl von angeforderten Veranstaltungsartikeln auf. Die Ergebnisse auf Abbildung 5.16 und 5.17 zeigen entsprechend eine Zunahme der Laufzeit, der Gesamt- sowie der Mietkilometer für alle drei Ansätze. Die Gesamtkilometer liegen zwischen 3823km für die selbststeuernde Disposition und 22883km für das Simulated Annealing. Der Ist-Zustand positioniert sich, wie bereits in den vorangegangenen Settings, mit 5261km zwischen den beiden anderen Ansätzen. Es zeigt sich erneut, dass das Simulated Annealing in den gegebenen Parametern nicht in der Lage ist, die vom Ist-Zustand übernommene Ausgangslösung zu verbessern. Durch die Beschränkung der Schrittzahl erreicht die Heuristik nur durchschnittlich 21498km als Gesamtdistanz, wobei sie um bis zu 964km streut.

Weiterhin benötigt der Ansatz im Mittel 3170 Mietkilometer, bei Extremwerten zwischen 2908 und 3319km. Betrachtet man hingegen die selbststeuernde Disposition und den Ist-Zustand, so erzielen beide Ansätze Gesamtkilometerwerte in ähnlicher Höhe, wie das Simulated Annealing Mietkilometer benötigt. Die hierbei notwendige Laufzeit der selbststeuernden Disposition liegt bei 2386 CPU-Sekunden, während das Simulated Annealing nach 3320, bzw. 3354 CPU-Sekunden die maximale Schrittmenge absolviert hat. Die Streuung liegt hierbei zwischen 1.1 und 17 Sekunden bei einem absoluten Mittel von 1,3 Sekunden. Generell ist die absolute mittlere Streuung der Heuristik bei den Gesamtkilometern am größten, hier liegen zwischen den einzelnen Durchläufen bis zu 964 Kilometer. Wie in den meisten anderen betrachteten Settings folgt darauf die Verteilung der Fahrzeugkilometer für die Lieferwagen, diese variiert im Mittel um 690km.

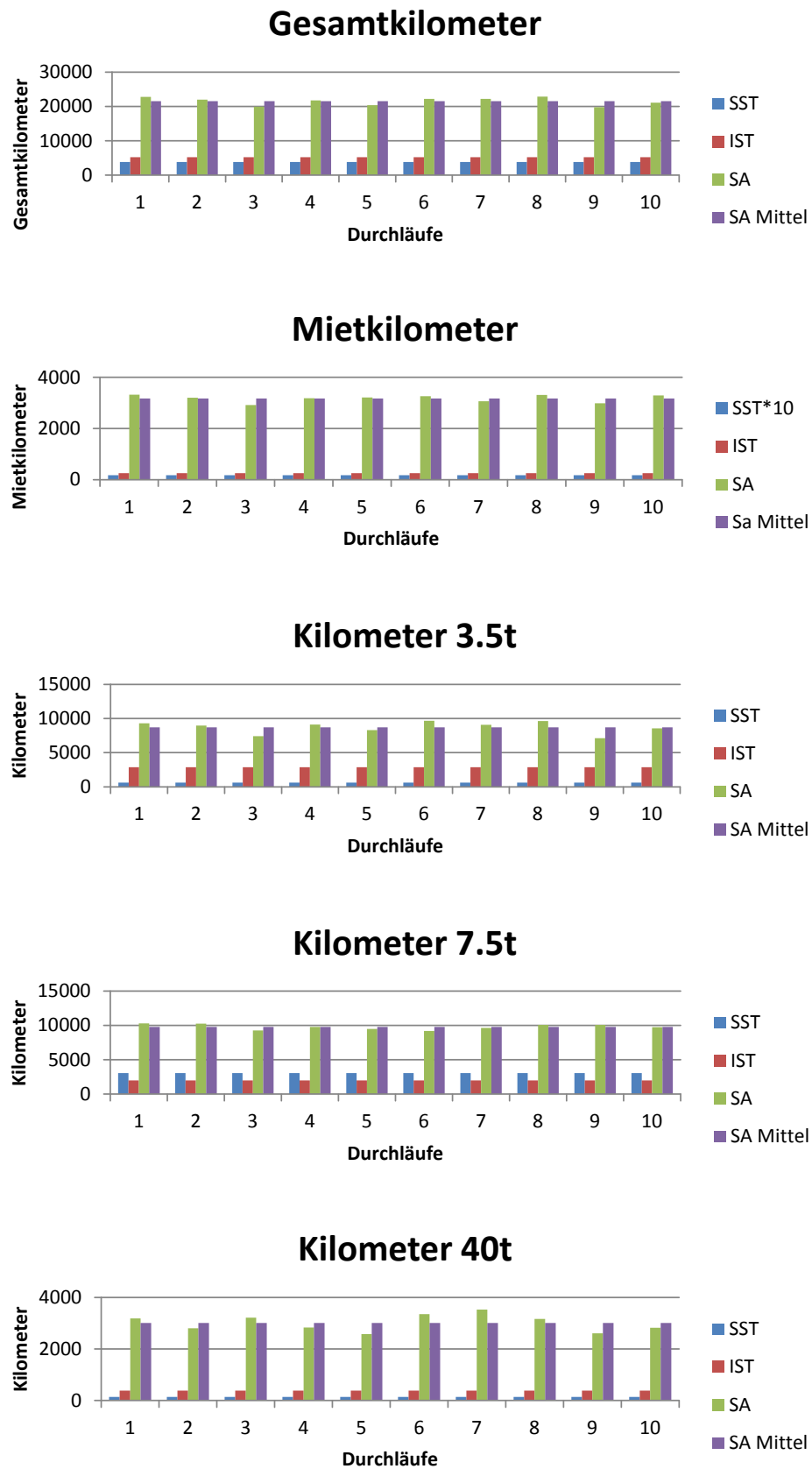


Abbildung 5.16: Teil 1 der Ergebnisse des zweiten Settings mit 50 Veranstaltungen in Szenario 2

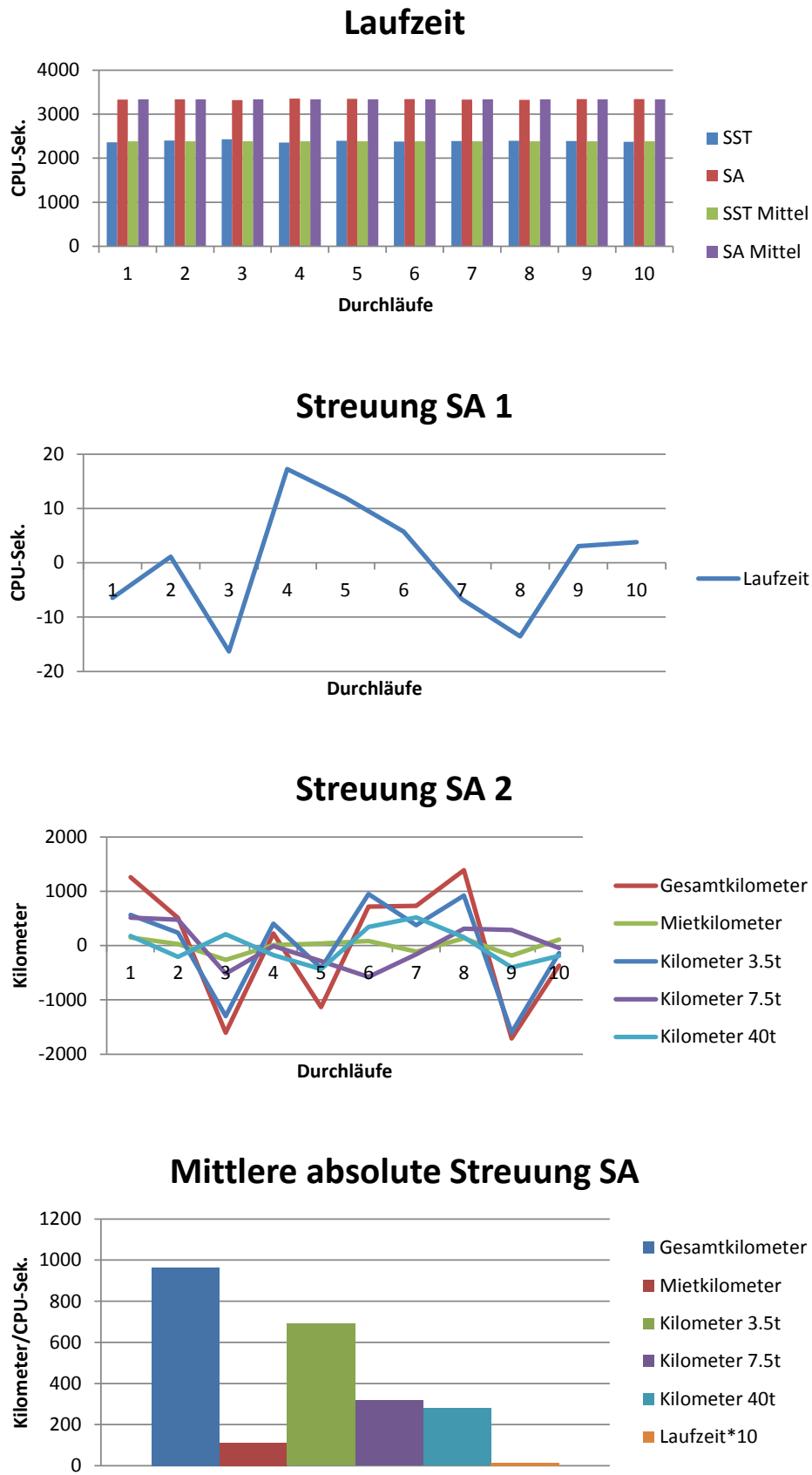


Abbildung 5.17: Teil 2 der Ergebnisse des zweiten Settings mit 50 Veranstaltungen in Szenario 2

Die Auslastung der Fahrzeugflotte für die drei Ansätze zeigt eine Inanspruchnahme aller drei Fahrzeugklassen. Neben den generellen Abweichungen der Kilometerleistung, die sich schon aus den disponierten Gesamtdistanzen ergeben, weisen die Ergebnisse erneut auf abweichende Präferenzen der drei Ansätze hin. Die selbststeuernde Disposition legt den Fokus auf die Kleinlastwagen, gefolgt von den Lieferwagen. Die Lkw werden nur in Ausnahmefällen genutzt, auf diese entfallen nur knapp 144 der insgesamt 3823km. Der Ist-Zustand disponiert wie gehabt zuerst die Lieferwagen und schreitet dann in der Belegung von den Kleinlastwagen zu den Lkw voran, während das Simulated Annealing die 7.5t-Fahrzeuge am meisten auslastet, gefolgt von den Lieferwagen und den Lkw.

Auswertung Szenario 2

Die Settings in Szenario zwei zeigen im Hinblick auf die erzielten Ergebnisse eine Fortsetzung der Trends des ersten Szenarios auf. So bewegen sich, unter Berücksichtigung der ansteigenden Zahl von Veranstaltungen, die erreichte Lösungsgüte und die hierfür notwendigen Laufzeiten in ähnlichen Relationen zueinander. Die selbststeuernde Disposition erreicht generell die besten Ergebnisse im Hinblick auf die Gesamtkilometer. Falls Mietkilometer notwendig werden, so unterbietet sie die beiden anderen Ansätze jeweils deutlich. Der Ist-Zustand nimmt in den meisten Fällen eine Mittelposition ein, er benötigt mehr Gesamt- und Mietkilometer. Weiterhin ist die Verteilung der Veranstaltungsartikel auf die kleineren Fahrzeugklassen konzentriert, auf die Lkw wird erst ausgewichen, wenn die anderen Fahrzeuge bereits belegt sind.

Das Simulated Annealing ist erneut in allen wesentlichen Kategorien unterlegen. So benötigt die Heuristik mehr Gesamt- und Mietkilometer, lastet die vergleichsweise teuren Lkw am meisten aus und benötigt deutlich längere Laufzeiten als die selbststeuernde Disposition. Lösungsgüte und Laufzeiten zeigen, dass die gestatteten 10.000.000 Schritte nicht ausreichend sind, eine Steigerung jedoch die Laufzeit zu stark verschlechtern würden. Zusammengefasst erreicht nur die selbststeuernde Disposition in den größeren Settings gute Lösungen in angemessener Zeit.

Fazit

Die Betrachtung der logistischen Leistungsfähigkeit zeigt, dass alle drei Ansätze generell zu einer integrierten Disposition und Routenplanung für die Veranstaltungslogistik in der Lage sind. In Abhängigkeit von den Rahmenbedingungen zeigen sich jedoch deutliche Unterschiede in der Güte der Ergebnisse und der jeweils für die Lösungssuche benötigten Zeitspanne. Hierbei ist die selbststeuernde Disposition den beiden anderen Ansätzen überlegen, was zumindest im Falle des Ist-Zustands zu erwarten war.

Das Simulated Annealing krankt in allen Szenarien gleichermaßen an der zu geringen Anzahl der verfügbaren Schritte zur Lösungssuche und der für eine dynamische Disposition nicht akzeptablen Laufzeit. Hier wäre für zukünftige Vergleiche eine sinnvolle Bestimmung des Initiallösung von Interesse, um hier eine Annäherung zwischen Lösungsgüte und Zeitaufwand zu finden. Weiteres Verbesserungspotential ist in der Repräsentation der betrachteten Teilprobleme für die Heuristik zu sehen. Hier sind weitere Forschungen sinnvoll, da die Betrachtung komplexer mehrkriterieller Optimierungsprobleme in der erreichten Ergebnisqualität stark von der Güte der Problemdarstellung abhängig ist. Da diese Arbeiten den Fokus der vorliegenden Arbeit überschreiten, wird im Folgenden keine weitere Optimierung des Simulated Annealing und seiner Anwendung auf das betrachtete Gesamtproblem mehr vorgenommen. Entsprechend basiert die folgende Wirtschaftlichkeitsbetrachtung auf einer Gegenüberstellung von selbststeuernder Disposition und Ist-Zustand.

5.3 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung des selbststeuernden Dispositionssystems betrachtet die Kosten und den Nutzen einer möglichen Einführung in der Veranstaltungslogistik für zwei Szenarien. Das Erste geht von einer Einführung im Beispielunternehmen aus. Hier wird angenommen, dass sich Anzahl, Art und Umfang der Aufträge über einen längeren Zeitraum im Vergleich zum Ist-Zustand nicht wesentlich verändern, so dass eine Hochrechnung des Kosten-/Nutzenverhältnisses und eine darauf aufbauende Abschätzung des zu erwartenden Amortisationszeitraumes möglich ist [118].

Auch das zweite Szenario stützt sich auf gleichbleibende Grundbedingungen hinsichtlich der Auftragseigenschaften, geht jedoch analog zur Leistungsbeurteilung im vorangegangenen Kapitel von einem möglichen Wachstum des Beispielunternehmens, bzw. dem Einsatz der selbststeuernden Disposition bei einem größeren, überregionalen Mitbewerber aus [119]. Im Folgenden werden nun beide Szenarien detailliert ausgeführt und im Anschluss eine Abschätzung getroffen, ob und über welchen Zeitraum jeweils eine Amortisation des Systems zu erwarten ist.

5.3.1 Einführung im Ist-Zustand

Zum Zeitpunkt der Anfertigung dieser Dissertationsschrift führt das Beispielunternehmen zwischen 250 und 300 Veranstaltungen pro Jahr aus. Diese werden, je nach der Anzahl der jeweils erforderlichen Verleihartikel, in kleine, mittlere und große Veranstaltungen unterteilt. Kann eine Veranstaltung mit einem Lieferwagen (3.5t) durchgeführt werden, handelt es sich um eine kleine Veranstaltung. Liegt der Bedarf bei einem oder mehreren Fahrzeug mit 7.5t oder 40t, wird analog von einer mittleren oder großen Veranstaltung gesprochen. Basierend auf diesen Zahlen und der erreichten Leistung des selbststeuernden Dispositionssystems, kann mit durchschnittlichen Einsparungen von zwischen 540 und 8055 Kilometern pro Jahr gerechnet werden, je nachdem, ob Gesamtanzahl und Zusammensetzung der durchgeführten Veranstaltungen an der unteren oder oberen Schranke der im Vorkapitel betrachteten Szenarien liegt.

Aufgeschlüsselt auf die Nutzung der verschiedenen Fahrzeugklassen, ergeben

sich somit Einsparungen von bis zu 9108,80 €, basierend auf Kilometerkosten von 0,82 € pro Kilometer für einen Lieferwagen mit 3.5t Nutzlast, 1,24 € für einen Lastwagen mit 7.5t und 1,85 € für einen mit 40t Kapazität [120, 121]. Legt man eine Durchschnittsgeschwindigkeiten der Fahrzeuge von 80 km/h zugrunde, ergibt sich hieraus eine Ersparnis von ca. 101 Stunden Fahrzeit, was bei einem Fahrer mit dem typischen monatlichen Bruttogehalt von 2600 € bei 40 Wochenstunden zu einer Kostenreduktion zwischen 669,60 € und 1636,17 € führt [122]. Tabelle 5.6 fasst das Einsparpotential noch einmal zusammen.

Tabelle 5.6: Mögliche Einsparungen durch den Einsatz der selbststeuernden Disposition

Kostenart	Menge	Faktor	Einsparung min	Einsparung max
Fahrtkosten 3.5t	0 - 2081	0,82 € pro Km	0 €	1706 €
Fahrtkosten 7.5t	540 - 5970	1,24 € Pro Km	669,60 €	7402,80 €
Fahrtkosten 40t	0 - 0	1,85 € Pro Km	0 €	0 €
Personalkosten	0 - 100,7	16,25 € pro Stunde	0 €	1636,17 €
		Gesamt	669,60 €	10.744,97 €

Diesen möglichen Einsparungen sind die Kosten der Einführung sowie nach deren Abschluss die Betriebskosten gegenüberzustellen. Die Kosten für eine Einführung sind wesentlich von der Art der Systementwicklung abhängig. Hier sind zwei Vorgehensweisen denkbar, die interne Entwicklung im Beispielunternehmen und die Vergabe eines Industriauftrages an ein Fremdunternehmen. Die Eigenentwicklung würde durch die betroffenen Abteilungen für Planung und Transport, unterstützt durch den IT-Verantwortlichen vorgenommen werden. Die folgende Kalkulation geht von diesem Fall aus, die Kosten für eine Fremdvergabe der Entwicklung werden im Anschluss betrachtet.

Ausgehend von den in der vorliegenden Arbeit gemachten Erfahrungen mit Komplexität, Umfang und Dauer der Entwicklung von Hard- und Software des selbststeuernden Dispositionssystems, sind für die interne Entwicklung und Einführung vier Personen notwendig. Dies ist ein Ingenieur als Projektleiter, ein Fachinformatiker zur Implementierung des Softwaresystems und zur Integration der Komponenten des Hardwaremoduls sowie ein technischer Zeichner und ein Mechatroniker für die Konzeption und elektrotechnische Umsetzung. Die Kosten für diese Fachkräfte werden wie folgt festgelegt. Für den Ingenieur zur Planung und Überwachung des Projekts wird von einem Monatsgehalt von 3.824 € brutto bei 40 Wochenstunden ausgegangen, was einem Stundensatz von 23,90 € entspricht [123]. Die Facharbeiter für Mechatronik, CAD-Design und Programmierung liegen bei 2.100 € brutto im Monat (13,13 €/Stunde), 2.300 € monatlich (14,38 € /Stunde) und 2.612 € (16,33 € pro Stunde) [124]. Die Kosten für die Arbeitsaufwände sind ohne Urlaubsgeld oder Sonderleistungen gewählt und beziehen sich auf eigene Angestellte des Beispielunternehmens, sind also nicht als Stundensätze inkl. Gemeinkosten und Gewinnmargen zu verstehen. In Anlehnung an die in der vorliegenden Dissertationsschrift durchgeführten

Arbeiten sind für Entwicklung, Implementierung und Einführung des selbststeuernden Dispositionssystems folgende Zeitaufwände und Kosten (Tabelle 5.7) anzunehmen.

Die Programmierung des selbststeuernden Dispositionssystems umfasst beim Softwarepart die Adaption von PlaSMA und wird mit neun Personenmonaten für einen Fachinformatiker angesetzt. Die Programmierarbeiten am Hardwaremodul umfassen die Konfiguration und Abstimmung von Gerätetreibern und Protokollen für den Datentransfer zwischen den Einzelkomponenten sowie die Implementierung eines Steuerungsprogramms auf der zentralen Recheneinheit. Hier sind 120 Stunden Aufwand vorgesehen, so dass sich für die Programmierarbeiten ein Teilbetrag von 25.474,80 € ergibt.

Der CAD-Entwurf des Hardwaremoduls wird mit 40 Stunden veranschlagt und schlägt entsprechend mit 575,20 € zu Buche, während die Projektleitung durch den Ingenieur für beide Systemteile zusammen auf 17.208 € zu beziffern ist. Hierbei verteilt sich der Aufwand auf neun halbe Personenmonate, die sich in etwa zu gleichen Teilen auf die Entwicklung der Hardware und die

Tabelle 5.7: Aufwandsabschätzung für die Eigenentwicklung und Einführung der selbststeuernden Disposition

Tätigkeit	Zeitaufwand		Kosten	
	Software	Hardware	pro Stunde	Teilbetrag
Programmierung	1440	120	16,33	25.474,80 €
CAD Entwurf	-	40	14,38	575,20 €
Projektleitung	360	360	23,90	17.208 €
Dokumentation	160	10	23,90	4.063 €
Testläufe	320	30	16,33/23,90	7.324,90 €
Systemintegration	160	110	13,13/16,33	3.977,10 €
Schulung	120	120	16,33/23,90	3.627,60 €
			Gesamt	62.250,60 €

Programmierung des Dispositionssystems verteilen. Die Dokumentation erfolgt ebenfalls durch den Projektingenieur, wobei hierunter nicht die Dokumentation des Quellcodes, sondern das Verfassen von Fortschrittsberichten, technischen Anleitungen und Skizzen zu verstehen ist. Hierfür sind insgesamt 170 Stunden vorgesehen, die sich im Wesentlichen auf die Arbeiten an PlaSMA konzentrieren. Die Kosten für die Dokumentation belaufen sich somit auf 4.063 €. Die Testläufe für die Systemteile werden von verschiedenen Personen ausgeführt und umfassen sowohl die Tests der Hardware als auch Testsimulationen mit PlaSMA. Hier sind für die Software der Projektingenieur und der verantwortliche Programmierer mit je einem Personenmonat vorgesehen, mit entsprechenden Kosten von 6.463 €. Die Hardwaretestläufe werden unter Beteiligung des Programmierers sowie des Mechatronikers vorgenommen und umfassen insgesamt 30 Stunden für jeden der Beteiligten (888,90 €). Aufsummiert ergibt sich somit für die Testläufe ein Gesamtaufwand von 7.324,90 €.

Die Systemintegration umfasst als letzter Punkt des Entwicklungsprozesses die Zusammenführung, Installation und Funktionsprüfung der Systemteile, deren Aufwand sich auf ca. 270 Stunden summieren dürfte. Hierfür sind erneut der

Projektleiter und die IT-Fachkraft je zur Hälfte verantwortlich, so dass sich die Kosten für die Arbeiten auf ca. 3977,10 € belaufen. Den Abschluss der gesamten Entwicklung bildet die Schulung der Mitarbeiter, die in der Veranstaltungsplanung und -durchführung mit dem selbststeuernden Dispositionssystem arbeiten. Hierfür werden inkl. der Vorbereitung ein Personenmonat für den Projektleiter und ein halber Personenmonat für den Programmierer kalkuliert, so dass die Schulungsmaßnahmen mit 3.627,6 € zu bepreisen sind.

Die Gesamtkosten für die Entwicklung und Einführung des selbststeuernden Dispositionssystems belaufen sich somit auf 62.250,60 €. Hinzu kommen die Hardwarekosten von 2277,39 € für die Teilkomponenten des Hardwaremoduls. Die betreffenden Werte entsprechend den Einkaufspreisen im dritten Quartal 2013 und entstammen einer Onlinerecherche. Für den Fuhrpark des Beispielunternehmens sind sechs Module notwendig, so dass die Hardwarekosten von 13.664,34 € zu einer Gesamtsumme von 75.914,94 € führen.

Für die Betriebskosten des Systems werden 500 € pro Jahr veranschlagt, in diesem Betrag sind die Stromkosten und Wartung der Server sowie evtl. Anpassungen der Dispositionssoftware an neue Programmversionen von Datenbank, PlaSMA oder des ERPs des Beispielunternehmens enthalten. Im Hinblick auf die in Kapitel 5.2 ermittelte logistische Leistungsfähigkeit ist mit einer Amortisation dieser Kosten über die erzielten jährlichen Einsparungen von 10.744,97 € nach einer Periode von sieben Jahren zu rechnen.

Neben der Eigenentwicklung ist noch eine Fremdvergabe der Entwicklung zu betrachten. Diese würde vergleichbare Arbeitsinhalte und -aufwände bedeuten, jedoch zu veränderten Kostenentwicklungen führen. Der folgenden Beispielrechnung sind die Kostensätze des BIBA - Bremer Institut für Produktion und Logistik GmbH an der Universität Bremen für Industrieaufträge, Stand 2013, zugrunde gelegt. Hier sind für den Projektleiter monatlich 5.258 € brutto und 3.950 € für einen Fachinformatiker zu veranschlagen. Daraus ergeben sich Stundensätze von 32,87 €, bzw. 24,69 €, die in diesem Falle inkl. Gemeinkosten und Gewinnmarge zu verstehen sind. Die Kostensätze für den Fachinformatiker sind auf andere technische Mitarbeiter übertragbar, so dass sie auch für den Mechatroniker und technischen Zeichner für die Hardwareentwicklung Anwendung finden.

Die Detailkalkulation für die Fremdentwicklung des selbststeuernden Dispo-

Tabelle 5.8: Aufwandsabschätzung für die Entwicklung und Einführung der selbststeuernden Disposition im Falle einer Auftragsentwicklung

Tätigkeit	Zeitaufwand			Kosten	
	Software	Hardware	pro Stunde	Teilbetrag	
Programmierung	1440	120	24,69	38.516,40 €	
CAD Entwurf	-	40	24,69	987,60 €	
Projektleitung	360	360	32,87	23.666,40 €	
Dokumentation	160	10	32,87	5.587,90 €	
Testläufe	320	30	24,69/32,87	9.948,70 €	
Systemintegration	160	110	24,69	6.666,30 €	
Schulung	120	120	24,69/32,87	7.233 €	
			Gesamt	92.606,30 €	

sitionssysteme ist Tabelle 5.8 aufgeschlüsselt. Bei den höheren Stundensätzen summiert sich die Gesamtsumme für die Arbeiten auf 92.606,30 €. Inklusive der unveränderten Hardwarekosten von 13.664,34 € lässt sich die Gesamtsumme auf 103.270,64 € beziffern. Eine Amortisation wäre somit erst nach ca. 10 Jahren zu erwarten. Für beide Rechnungen sei angemerkt, dass eine mögliche Vermarktung von Dispositionssystem und/oder Hardwaremodul nicht auszuschließen ist und ggf. zusätzliche Gewinne aufwerfen würde.

Eine abschließende Betrachtung der Einführungskosten und der möglichen Amortisationsdauer lässt eine Einführung im Beispielunternehmen zum momentanen Zeitpunkt wenig lohnenswert erscheinen. Bereits bei Annahme der größtmöglichen Ersparnisse liegt die Dauer bei sieben bis 10 Jahren, so dass sich bei den vergleichsweise kurzen Planungshorizonten im Veranstaltungsmanagement keine klare Empfehlung für eine Investition abgeben lässt.

5.3.2 Einführung in größerem Unternehmen

Für das Szenario eines größeren Mitbewerbers, bzw. eines entsprechend gewachsenen Beispielunternehmens, ergeben sich aus den erzielten Leistungsdaten der selbststeuernden Disposition mögliche Einsparungen zwischen 53.103 € und 82.106 € pro Jahr, so dass eine Amortisation bei einer Eigenentwicklung nach einem, bzw. 1,67 Jahren möglich wäre (Tabelle 5.9).

Tabelle 5.9: Mögliche Einsparungen durch den Einsatz der selbststeuernden Disposition (bei Fremdvergabe)

Kostenart	Menge	Faktor	Einsparung min	Einsparung max
Fahrtkosten 3.5t	585 - 83.362	0,82 € pro Km	480 €	68.357 €
Fahrtkosten 7.5t	36.383 - (+ 3.472)	1,24 € Pro Km	45.115 €	-4.305 €
Fahrtkosten 40t	0 - 8971,15	1,85 € Pro Km	0 €	16.596 €
Personalkosten	462 - 1111	16,25 € pro Stunde	7.508 €	18054 €
		Gesamt	53.103 €	82.106 €

Die Kosten für Entwicklung und Einführung des Systems wären bis auf die Hardware identisch, hier erfordert der größere Fuhrpark eine zusätzliche Investition von 25.047 €. Die notwendigen Investitionen für die beiden Fälle Eigenentwicklung und Fremdvergabe als Industriauftrag sind in Tabelle 5.10 im Vergleich zu sehen. Hierbei sind die Hardwareinvestitionen bereits berücksichtigt.

Eine Einführung der selbststeuernden Disposition bei Fremdvergabe führt im besten Falle zu einer Amortisation nach ca. 1,5 Jahren, während sich im schlechtesten Falle eine Amortisation nach ca. 2,22 Jahren einstellt.

Tabelle 5.10: Kosten für Eigenentwicklung und Fremdvergabe im größeren Anwendungsfall

Entwicklungsart	Kosten Entwickl.	Hardwarekosten	Gesamt
Eigenentwicklung	63.753 €	25.047 €	88.800 €
Fremdauftrag	92.606 €	25.047 €	117.653 €

Fazit Wirtschaftlichkeitsrechnung

Die vorgenommene Wirtschaftlichkeitsrechnung geht von einer Amortisation für die beiden Fälle Ist-Zustand und gewachsenes bzw. Fremdunternehmen, nach 7-10, bzw. anderthalb bis zweieinhalb Jahren aus. Daraus lässt sich schließen, dass der durch die selbststeuernde Disposition erzielte Vorteil analog zur Anzahl der Aufträge und der damit einhergehenden Komplexität der Veranstaltungsplanung wächst.

Für den Ist-Zustand ist der Nutzen überschaubar, so dass sich perspektivisch die Einführung eher für ein größeres Unternehmen lohnt, da der Break-Even Point hier zwischen den beiden Szenarien zu liegen scheint. Eine abschließende Beurteilung wäre jedoch nur in der Praxis möglich, da die vorgenommene Einschätzung auf Annahmen beruht, die in der praktischen Anwendung entsprechenden Abweichungen unterliegen dürften.

So wird in der Beispielrechnung von einem gleichbleibenden Schnitt hinsichtlich der Verteilung und Anzahl der Veranstaltungen ausgegangen. D.h. im Ist-Zustand wird weiterhin mit bis zu 300 Veranstaltungen pro Jahr kalkuliert, von denen jeweils 5-20 gleichzeitig zu disponieren sind. Entsprechend können die simulativ errechneten Einsparungen durch den Einsatz der selbststeuernden Disposition entweder 60x oder 15x in die Gesamtrechnung einfließen. Für das größere Unternehmen wird nicht auf die Gesamtanzahl der Veranstaltungen, sondern ausgehend vom jeweiligen Dispositionszeitraum auf das ganze Jahr hochgerechnet. So ergeben sich die Einsparungen aus den Settings jeweils 36,5x.

In beiden Fällen wird von einer vergleichbaren Artikelverteilung ausgegangen, die in der Realität stark variieren kann. Weitere Unsicherheiten sind im Bereich der Personal- und Transportkosten (Treibstoff, etc.) zu sehen, so dass die

obige Rechnung als grobe Eingrenzung der Rahmenparameter zu verstehen ist. Weiterhin ist davon auszugehen, dass, je nach durchschnittlicher Nutzung von Mietfahrzeugen, zusätzliche Hardwaremodule vorzuhalten sind.

Kapitel 6

Fazit und Ausblick

Das in dieser Arbeit entwickelte selbststeuernde Dispositionssystem stellt einen Ansatz für die kombinierte Anwendung bestehender Selbststeuerungsmethoden in der Praxis dar. Die Konzeption des Systems führt hierbei die bereits in der Forschung erbrachten Grundlagenergebnisse zusammen und adaptiert sie für den Einsatz im praktischen Umfeld.

Als Beispiel dient die Veranstaltungslogistik, die sich als Teil der Veranstaltungsbranche mit der Herausforderung einer Planung unter dynamischen Bedingungen konfrontiert sieht. Diese werden einerseits durch veränderliche Kundenanforderungen, die kurzfristig geplante, individuelle Veranstaltungen wünschen, an die Verantwortlichen herangetragen, andererseits sind sie durch die unternehmerischen Überlegungen hinsichtlich des effizienten Einsatzes der verfügbaren Ressourcen bedingt. Letztere sind zum einen die Transportmittel und das Personal, zum anderen Ausrüstungsgegenstände für die Durchführung der Veranstaltungen, die als Verleihartikel in einem veränderlichen Logistiknetzwerk zwischen ihren Einsatzorten zirkulieren. Das selbststeuernde Dispositionssystem kombiniert das DLRP als Methode der selbststeuernden Routenplanung mit dem Simulationswerkzeug PlaSMA, um eine flexible und adaptive Planung zu ermöglichen. So sind alle Ressourcen innerhalb des Systems als autonome Objekte mit individuellen Zielen und Fähigkeiten repräsentiert, die kollaborativ an der Erfüllung der individuellen und globalen Ziele arbeiten. Ergebnisse dieser selbststeuernden Planung sind Lade-, Kommissionier- und Transportlisten sowie die Routen für die Transportfahrzeuge.

Die berücksichtigten Eigenheiten und prozessualen Anforderungen beruhen auf

einem Praxisfall aus dem Anwendungsfeld und werden mittels der ALEM-Methodologie in ein Dispositionssystem überführt, dass sich in der Evaluation den Anforderungen des Praxisfalls gewachsen zeigt und Potential für die Anwendung in größeren Szenarien aufweist.

Für die Zukunft stellt sich die Frage nach der Übertragbarkeit der gewonnenen Erkenntnisse auf andere Bereiche von Produktions- und Logistiksystemen. So existieren Parallelen zwischen der Zirkulation von Ladungsträgern wie Paletten, Aufliegern oder Containern und der von Verleihartikeln in der Veranstaltungsbranche. Aktuelle und jüngst abgeschlossene Projekte betrachten die Anwendung von Selbststeuerungsmethoden in den betreffenden Gebieten, hier sind Synergieeffekte bei der Entwicklung und Ausgestaltung selbststeuernder Systeme zu erwarten. Weiterhin ist von Interesse, inwiefern das Paradigma der Selbststeuerung als Ablösung oder Erweiterung der etablierten Planungsmethoden zentraler Natur zu sehen ist. Ob und inwiefern sich zentrale und dezentrale Methoden ergänzen oder ausschließen, bzw. wo und unter welchen Bedingungen der Nutzen zu einer der beiden Paradigmen tendiert, wird sich noch zeigen müssen.

Weiterhin ist, um die Güte der selbststeuernden Disposition zu erhöhen, eine Beladungsplanung zu entwickeln, die die Auslastung der Transportkapazitäten im Hinblick auf das Raumvolumen und das Gewicht verbessert. Hierzu muss eine entsprechende Planung in der Lage sein, die Dimensionen der Verleihartikel zu berücksichtigen und gleichzeitig allen Anforderungen hinsichtlich der Ladungssicherheit (Schwerpunkt des Fahrzeuges) und einer Artikelanordnung erfüllen, die die Reihenfolge der Ladebewegungen auf der Transportroute bestmöglich abdeckt.

Anhang A

Zusätzliches Material (Appendix)

Die folgenden Seiten enthalten zusätzliche Materialien, die in den vorangegangenen Kapiteln aus Platzgründen nicht berücksichtigt werden konnten.

A.1 Ergänzungen zu Kapitel 2

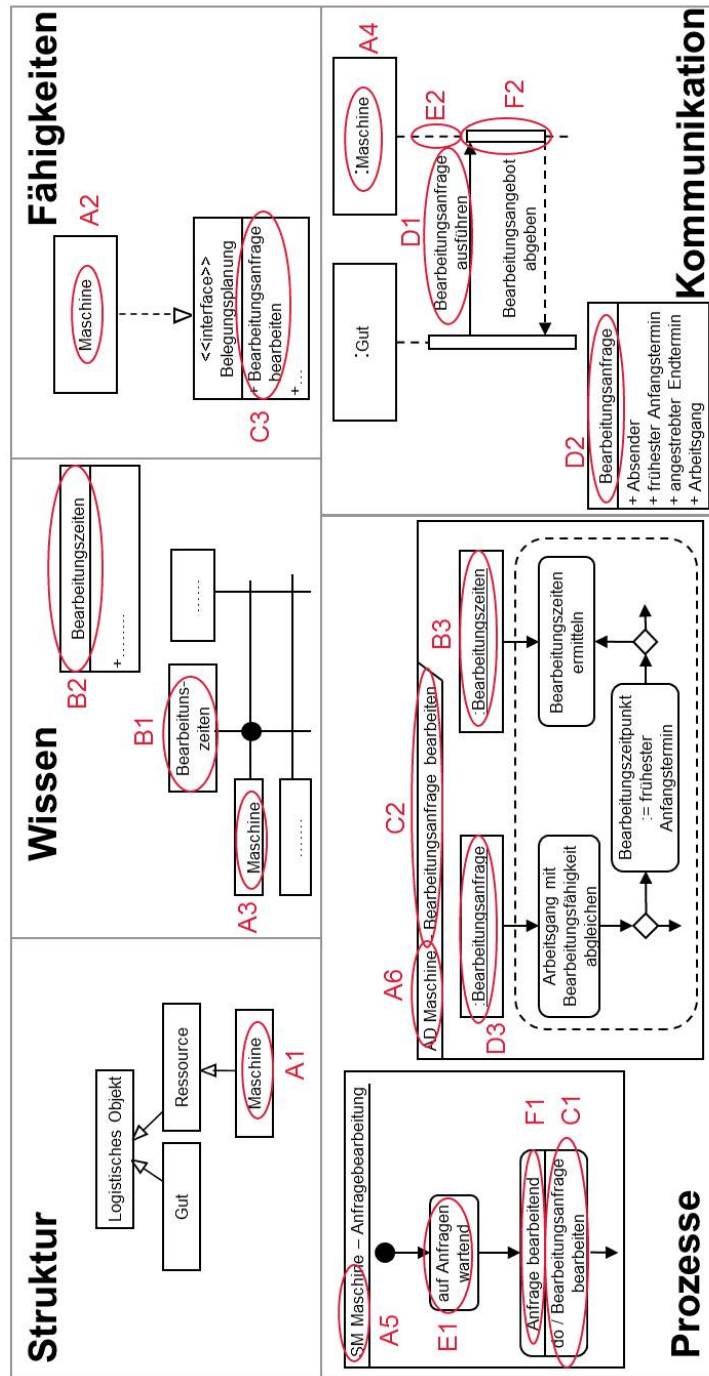


Abbildung A.1: ALEM-Sichten nach [8], Ergänzung zu Kapitel 2.4

A.2 Ergänzungen zu Kapitel 4

A.2.1 Ist-Prozessaufnahme

Im Folgenden sind die einzelnen Phasen der Veranstaltungsdurchführung als Flussdiagramme zu sehen. Die einzelnen Phase sind hierbei vereinfacht dargestellt, da sie vorrangig die künstlerische Konzeption der Veranstaltung betrachten. Diese stellt zwar die Grundlage der Ressourcenallokation durch das selbststeuernde Dispositionssystem dar, wird jedoch vom System nicht beeinflusst.

Phase1 - Grobplanung

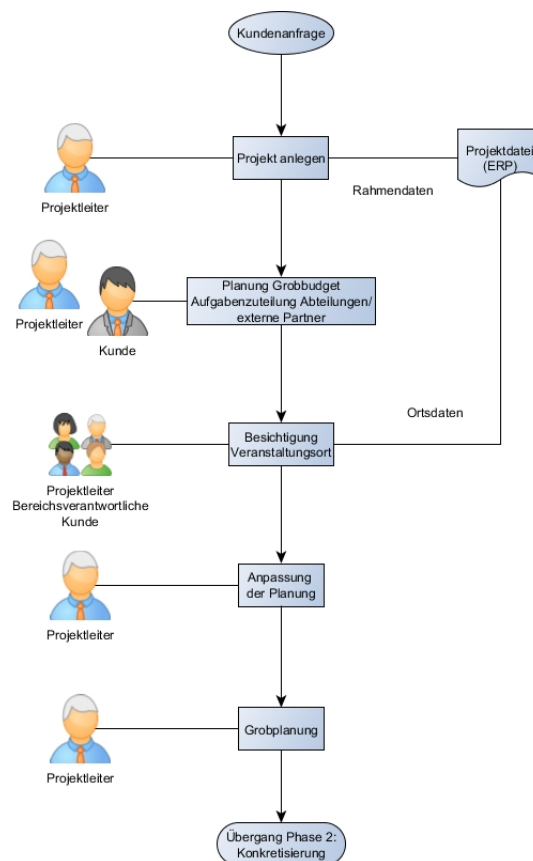


Abbildung A.2: Phase 1 der Veranstaltungsplanung

Phase 2 - Konkretisierung

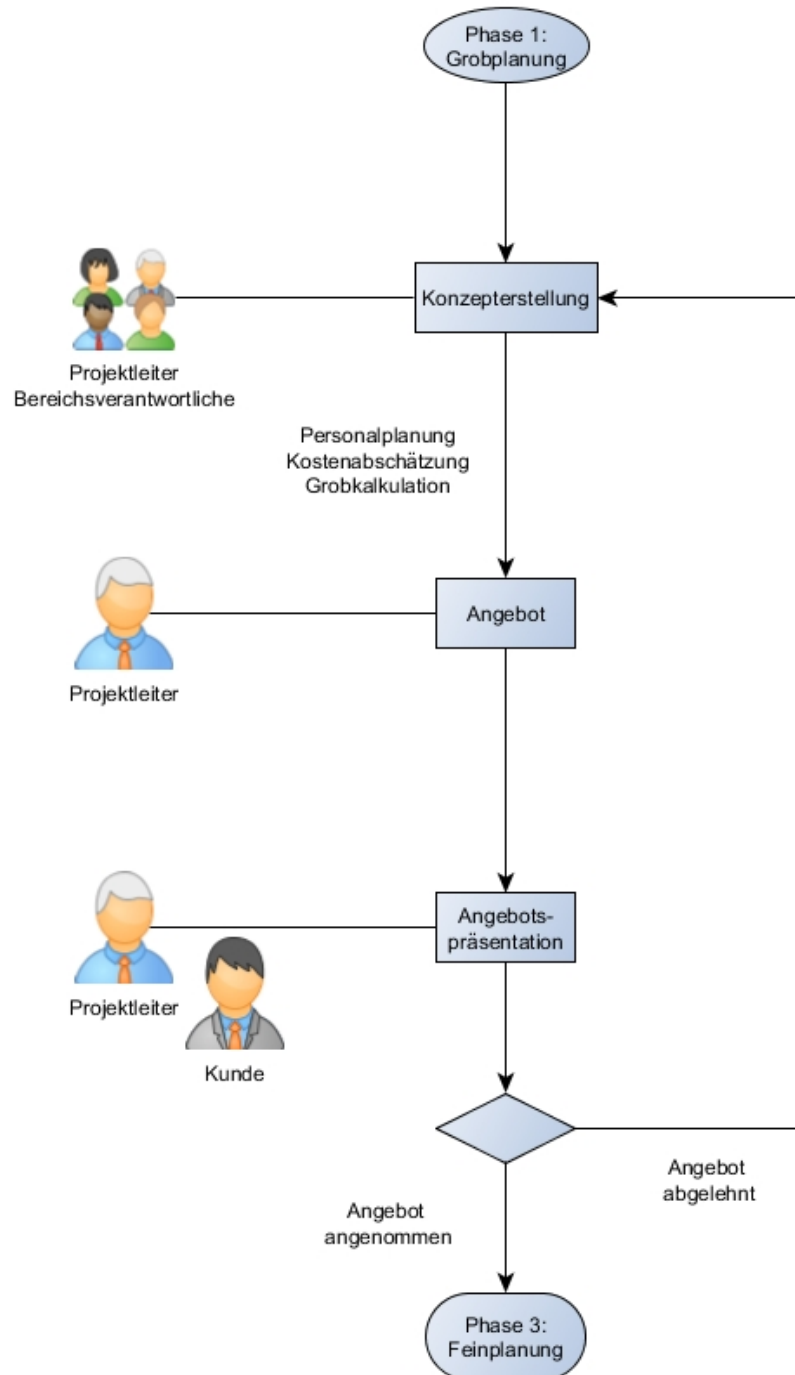


Abbildung A.3: Phase 2 der Veranstaltungsplanung

Phase 3 - Feinplanung

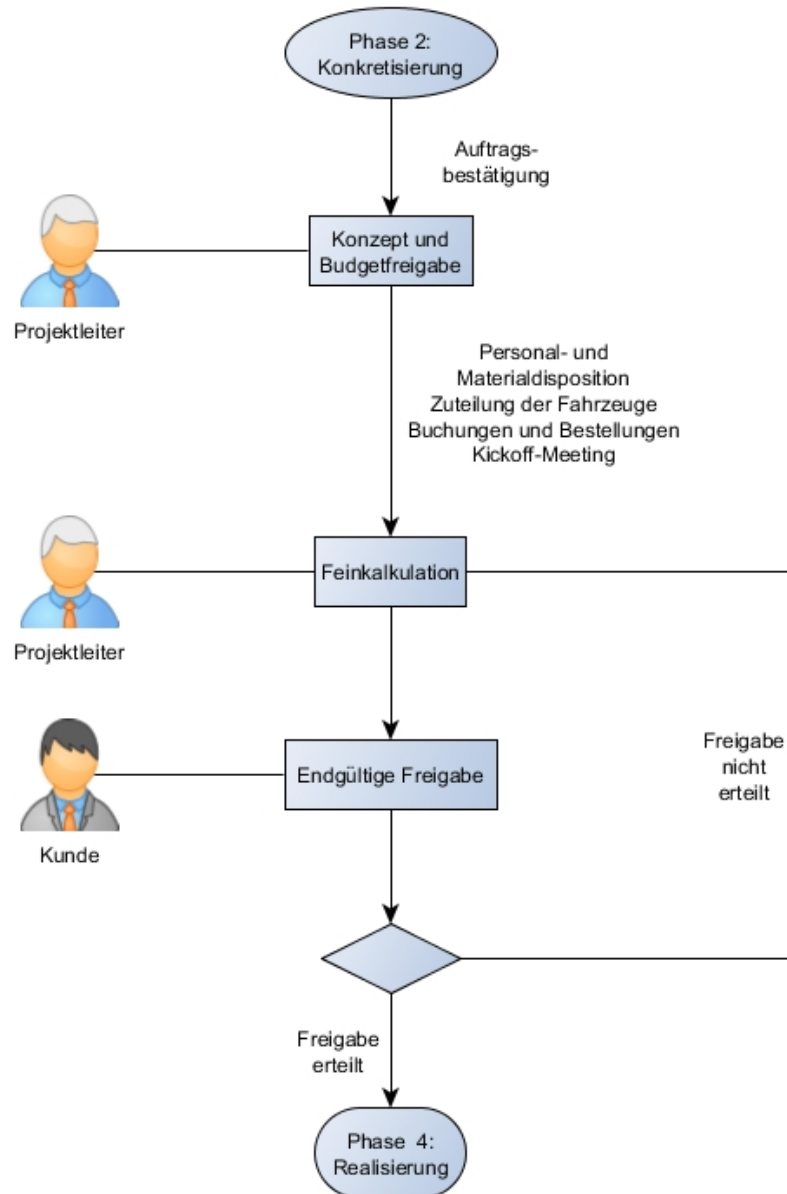


Abbildung A.4: Phase 3 der Veranstaltungsplanung

Phase 4 - Realisierung

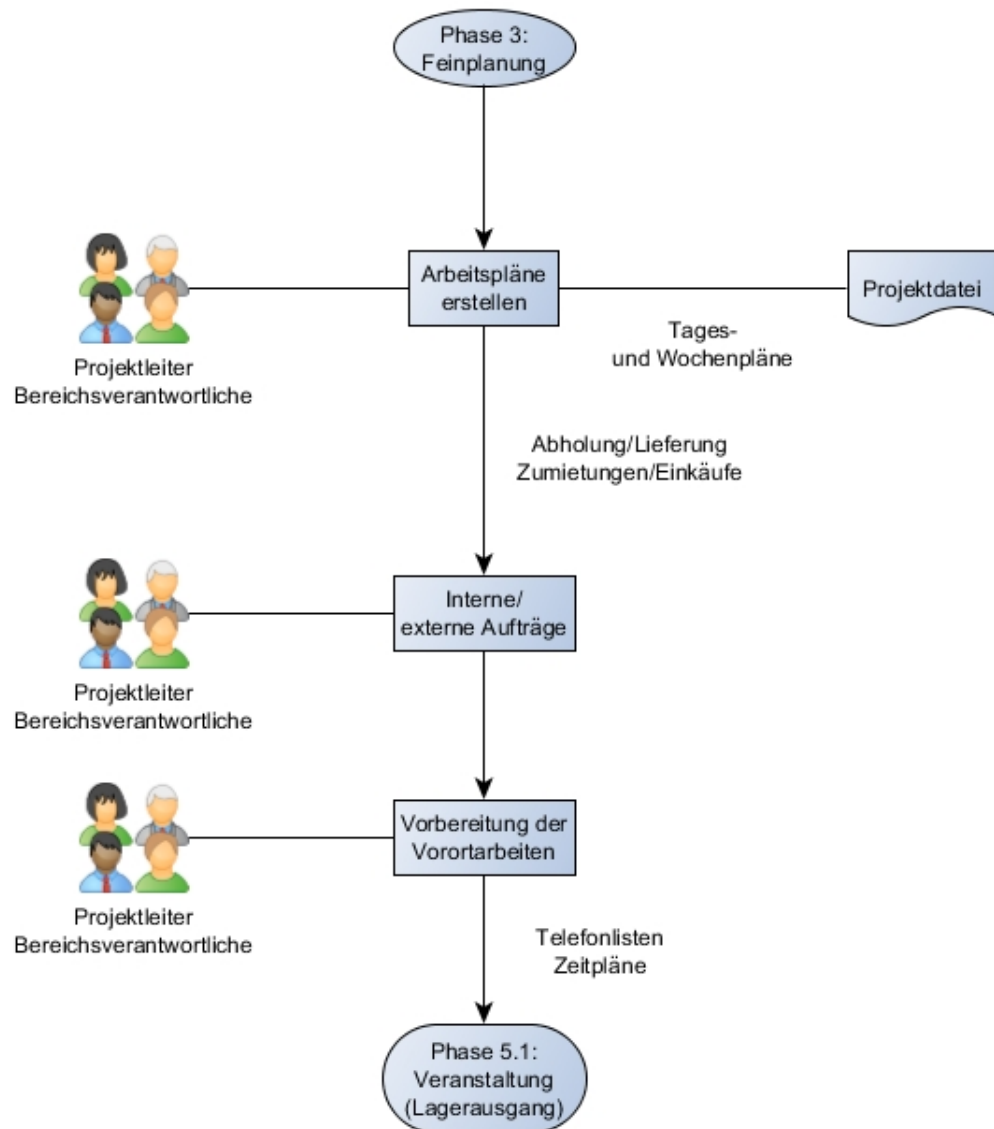


Abbildung A.5: Phase 4 der Veranstaltungsplanung

Phase 5.1 - Lagerausgang

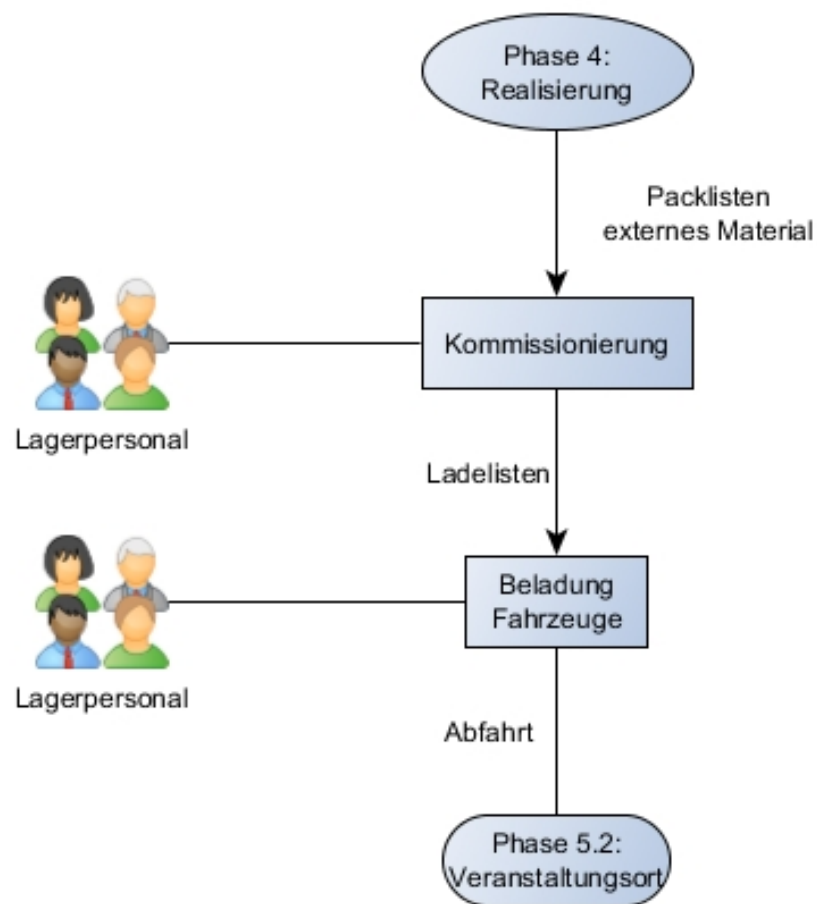


Abbildung A.6: Phase 5.1 der Veranstaltungsplanung

Phase 5.2 - Veranstaltungsort

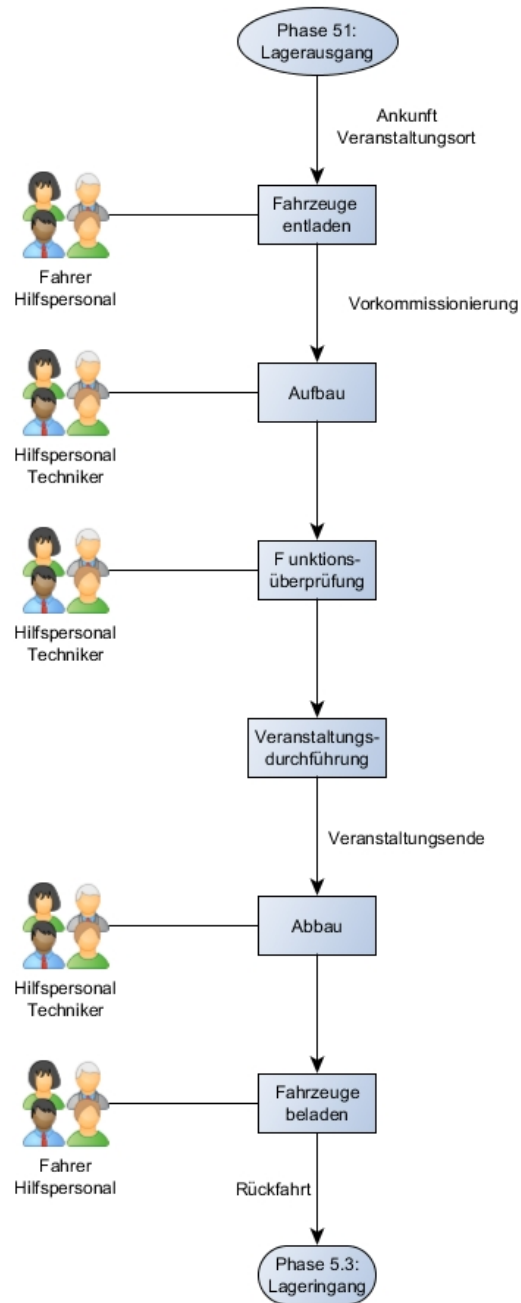


Abbildung A.7: Phase 5.2 der Veranstaltungsplanung

Phase 5.3 - Lagereingang

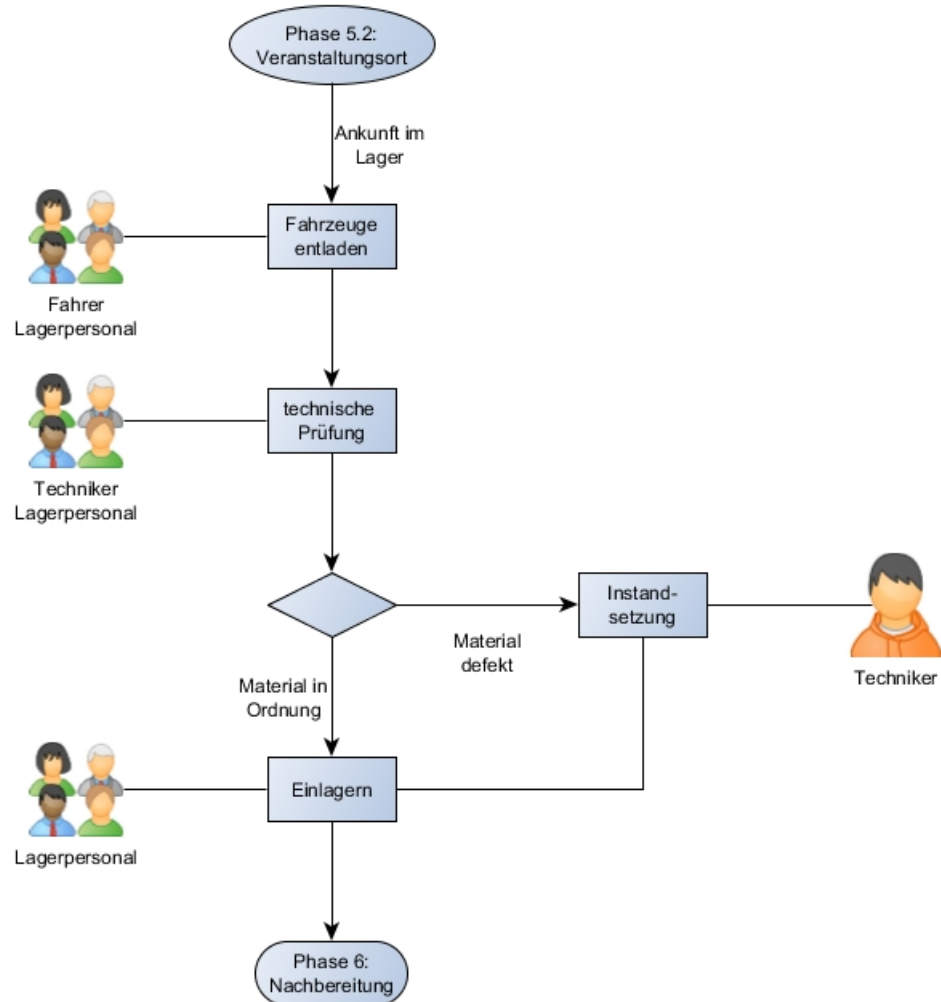


Abbildung A.8: Phase 5.3 der Veranstaltungsplanung

Phase 6 - Quality Gate/Nachbereitung

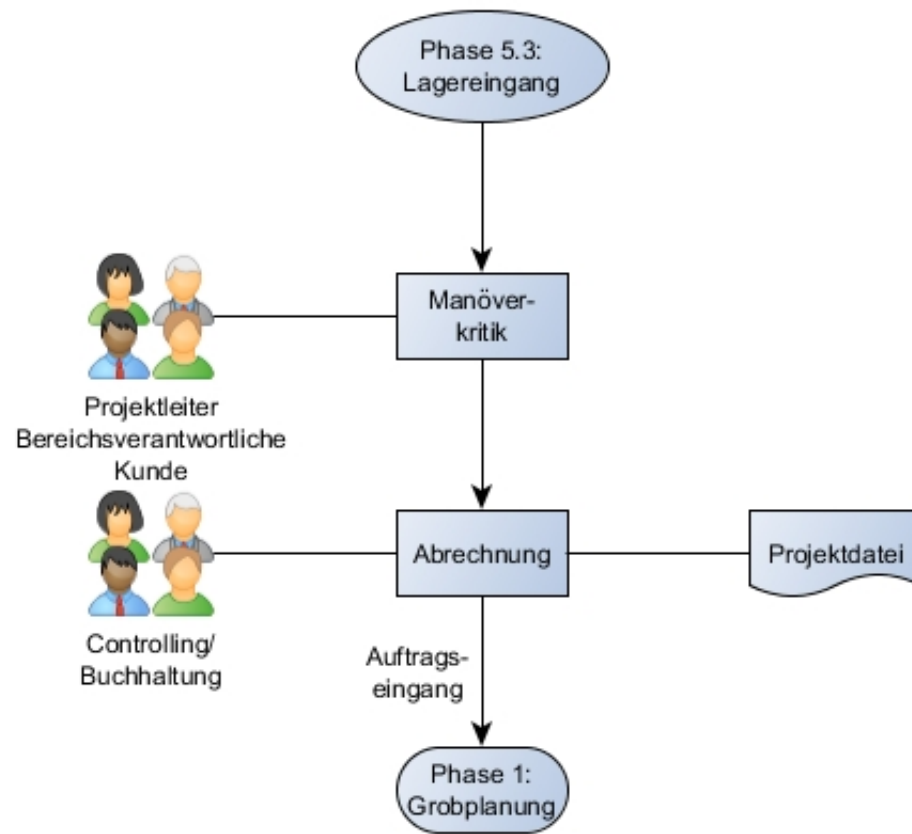


Abbildung A.9: Phase 6 der Veranstaltungsplanung

A.2.2 ALEM: Zieldefinition

Dieser Abschnitt enthält die Ableitung von Teilzielen auf Grundlage der in Abschnitt 4.3.1 definierten globalen Ziele des selbststeuernden Dispositionsystems, sofern noch nicht in Kapitel 4 behandelt. Im Wesentlichen sind dies das Teilziel der höheren Auslastung für Transportmittel, Verleihartikel und Personal. Abbildung A.10 zeigt die Ableitung des entsprechenden Teilzieles als Aufgabe für die Verleihartikel.



Abbildung A.10: Teilziel höhere Auslastung für Verleihartikel

Hierbei ist eine höhere Auslastung nur durch eine häufigere Nutzung möglich, die durch das Ziel möglichst kurzer Zeiträume zwischen den Einsätzen der Artikel zu erreichen ist. Im Rahmen der selbststeuernden Disposition wird ein Verleihartikel entsprechend an einer möglichst großen Anzahl von Verleihzyklen pro Zeiteinheit interessiert sein. Ähnlich sind die Mitarbeiter daran interessiert, innerhalb der Beschränkungen ihrer Arbeitszeit möglichst oft eingesetzt zu werden (Abbildung A.11), um in der Summe eine effiziente Nutzung ihrer Arbeitskapazität zu erreichen.

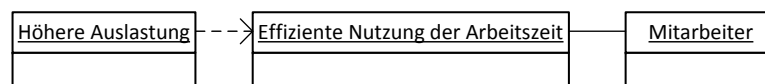


Abbildung A.11: Teilziel höhere Auslastung für die Mitarbeiter

Die Transportmittel sind, verknüpft mit den Zielen der Verleihartikel hinsichtlich einer möglichst häufigen Nutzung, auf eine maximale Belegung ihrer Transportkapazitäten hin ausgelegt. Dies bedingt neben einer möglichst hohen Nutzungsfrequenz auch eine effiziente Routenplanung (Abbildung A.12).

Die hier aufgeführten Teilziele bilden in Summe die Grundlage für die Aufgaben jedes logistischen Objektes. Aus diesen lassen sich wiederum die für die Lösung der Aufgaben notwendigen Fähigkeiten und Kenntnisse ableiten, so dass sich

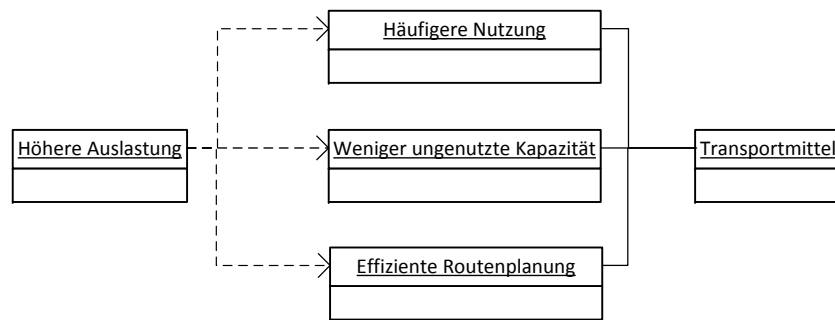


Abbildung A.12: Teilziel höhere Auslastung der Transportmittel

bei korrekter Modellierung und Implementierung in Summe das gewünschte Systemverhalten unter Erreichung der lokalen und globalen Ziele ergibt.

A.2.3 ALEM: Fähigkeiten

Dieser Abschnitt enthält die Definition der Fähigkeiten für jede Klasse logistischer Objekte innerhalb des selbststeuernden Dispositionssystems (vgl. Kapitel 4.3.3). Neben den bereits an entsprechender Stelle in Kapitel 3 erläuterten Klassen Verleihartikel und Fahrzeug existieren noch die Klasse Komponente, sowie die Managerklassen für Veranstaltungen (ListManager), Artikel (ArticleManager) und die Fahrzeugflotte (FleetManager). Die Managerklassen sind für die Koordination der Verhandlungen verantwortlich, sie erleichtern die Synchronisierung der Verhandlungsschritte innerhalb von PlaSMA (siehe Kapitel 4.4). Daher besitzen sie im Gegensatz zu Fahrzeugen sowie Artikeln und deren Komponenten keine physische Entsprechung in der realen Welt, spielen jedoch für die selbststeuernde Disposition eine wichtige koordinative Rolle.

Die Komponente verfügt als Klasse über ähnliche Fähigkeiten wie die bereits erwähnten Klassen der Verleihartikel und der Fahrzeuge. Wie diese geben Artikel in Abhängigkeit von Anfragen Angebote hinsichtlich ihrer Verfügbarkeit zum Einsatz bei Veranstaltungen ab. Hierzu sind sie in der Lage, ihre Verfügbarkeit zu prüfen, Transportangebote einzuholen und entsprechende Rückmeldungen zu geben. Im Fall der Komponenten gehen diese an den Artikel, zu dem sie gehören, die Transportfahrzeuge berichten an den FleetManager als Koordinator der Fahrzeugflotte. Abbildung A.13 zeigt die Fähigkeiten, die Komponenten für ihre Aufgaben im Verhandlungsprozess benötigen.

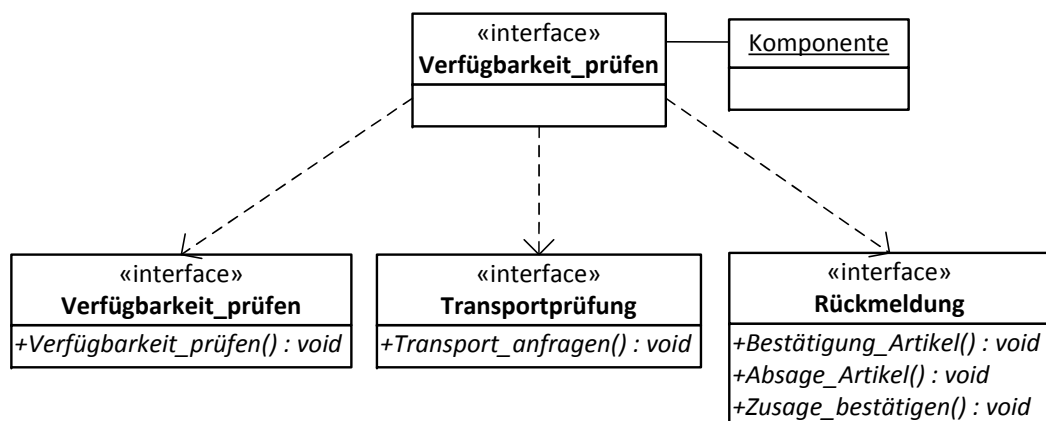


Abbildung A.13: Fähigkeiten der Objekte in der Klasse Komponenten

Im Verhandlungsverlauf interagiert die Komponente mit einem ComponentManager. Dieser koordiniert die Prozesse zur Angebotserstellung zwischen einem Verleihartikel und seinen Komponenten. Zu diesem Zweck ist jedem mehrteiligen Artikel ein solcher Manager zugeordnet, dessen Fähigkeiten entsprechend auf die Tätigkeit als Mittler zwischen den beiden Klassen ausgerichtet ist (siehe Abbildung A.14). Er bündelt die Anfragen an die Komponenten und sorgt so dafür, dass ein Verleihartikel nicht all seinen Komponenten einzeln verhandeln muss. Auf diese Art wird die Anzahl der notwendigen Teilschritte und der zugehörigen Nachrichten während der PlaSMA-Simulation reduziert.

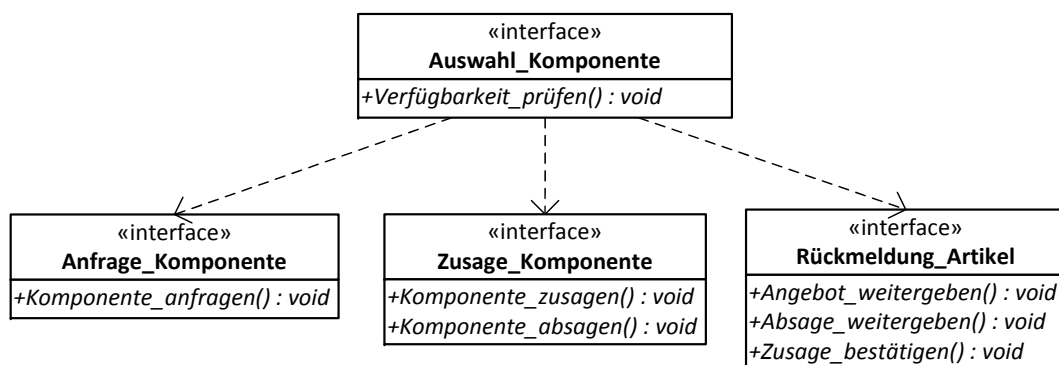


Abbildung A.14: Fähigkeiten der Klasse ComponentManager

Die Managerklassen für Artikel (ArticleManager) und die Transportflotte (FleetManager) besitzen ähnliche Aufgaben, entsprechend sind ihre Fähigkeiten analog aufgebaut (Abbildungen A.15 und A.16).

Der ArticleManager bildet hierbei die Schnittstelle zwischen den Verleihartikeln und dem ListManager (Abbildung A.17). Dieser vertritt in den Verhandlungen eine Veranstaltung und versucht, die in der Grobplanung erstellte Liste von Artikeln, bzw. Artikelfamilien, konkret zuzuweisen. Hierzu gehört die Koordination der Geräteauswahl sowie der Transporte und der sich hieraus ergebenden Routen. Gelingt dies, ist die Veranstaltung disponiert. Eine erfolgreiche Disposition aller offenen Veranstaltungen führt zum Ende der PlaSMA-Simulationen und zur Ausgabe der Planungsergebnisse.

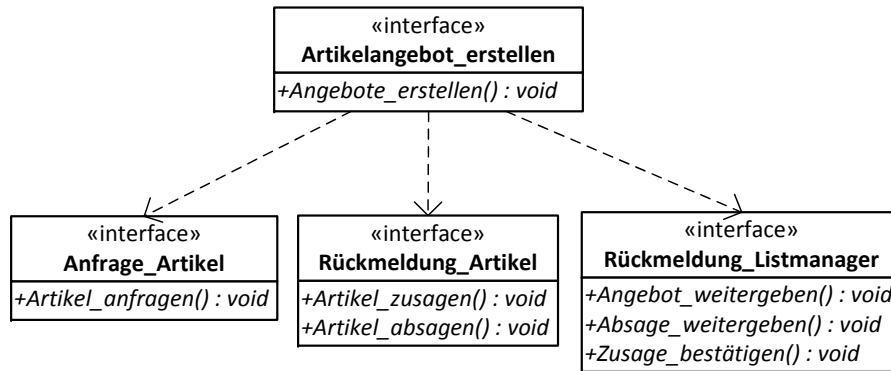


Abbildung A.15: Fähigkeiten der Klasse ArticleManager

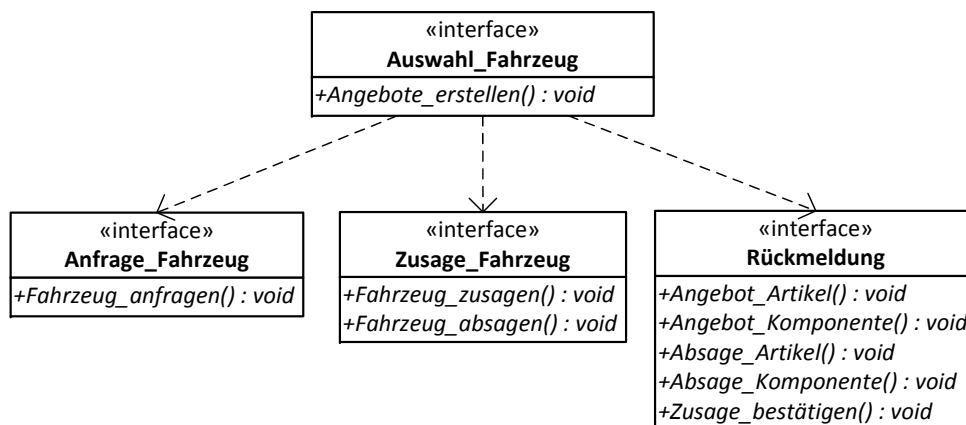


Abbildung A.16: Fähigkeiten der Klasse FleetManager

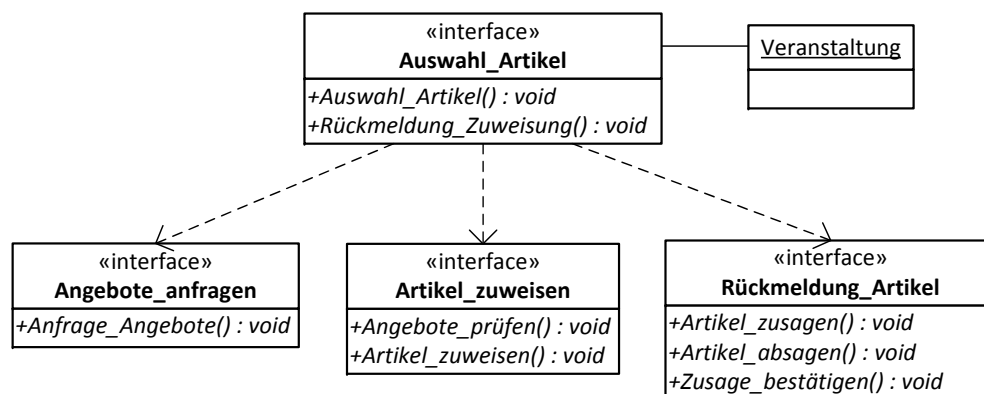


Abbildung A.17: Fähigkeiten der Klasse ListManager

A.2.4 ALEM: Prozesse

Dieser Abschnitt enthält die in Kapitel 4.3 aus Platzgründen nicht aufgeführten Lebenszyklen selbststeuernder logistischer Objekte und die durch ihre Verknüpfung definierten Prozesse. Es sei angemerkt, dass bei Letzterem bereits die beteiligten logistischen Objekte und die Wissensobjekte aufgeführt sind. Die Entwicklung und Modellierung des notwendigen Objektwissens findet in Kapitel 4.3.6 statt.

Im Folgenden werden nun zuerst die Lebenszyklen der Manageragenten dargestellt. Diese sind für die Koordination der Verhandlungsprozesse innerhalb der PlaSMA-Simulation verantwortlich und besitzen keine physische Entsprechung innerhalb der Veranstaltungslogistik. Den Anfang macht der ArticleManager auf Abbildung A.18.

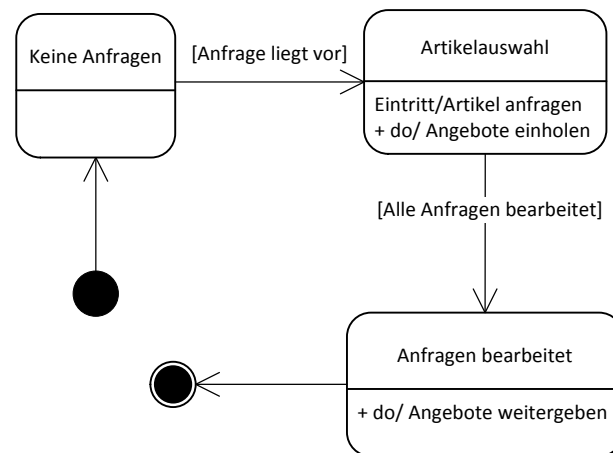


Abbildung A.18: Lebenszyklus des ArticleManagers

Der ArticleManager bündelt die Anfragen an die Artikel einer Artikelfamilie, entsprechend existiert innerhalb der Simulation ein solcher Manager für jede Artikelfamilie im Bestand. Ähnliche Manageragenten gibt es für die Komponenten eines Artikels (ComponentManager) und die Fahrzeugflotte (Fleetmanager). Da sie innerhalb des Verhandlungsprozesse ähnliche Aufgaben wahrnehmen, gleichen sich ihre Lebenszyklen (Abbildungen A.19 und A.20).

Als weiteres logistisches Objekt tritt die Komponente auf. Sie ist Teil eines Verleihartikels und verhält sich in dieser Rolle ähnlich, wie ein Verleihartikel zu seiner Artikelfamilie. Wie der übergeordnete Verleihartikel und das Fahrzeug

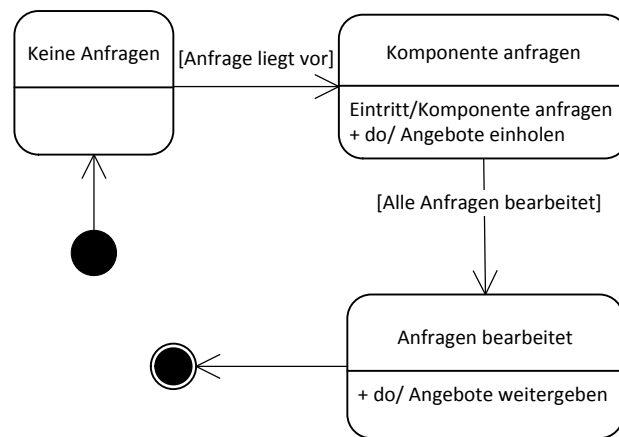


Abbildung A.19: Lebenszyklus des ComponentManagers

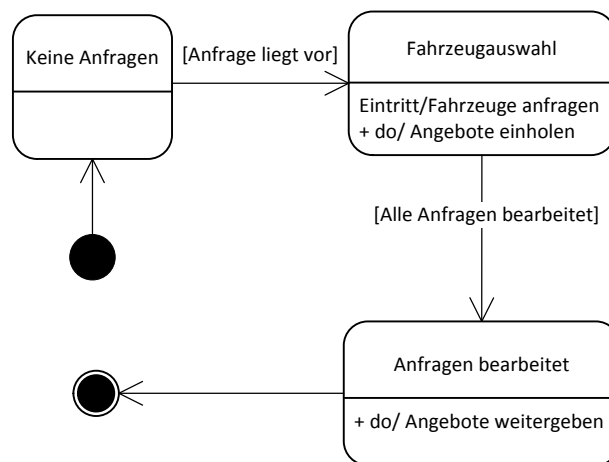


Abbildung A.20: Lebenszyklus des FleetManagers

verarbeitet die Komponente Anfragen hinsichtlich Verfügbarkeit und Zustand und erstellt in Zusammenarbeit mit dem Fahrzeug Angebote. Diese enthalten die Transportkosten der Komponente für den Fall, dass sie der anfragenden Veranstaltung zugewiesen wird. Das Angebot eines aus mehreren Komponenten bestehenden Artikels summiert die einzelnen Posten für den Komponententransport zu einer Gesamtsumme auf, so dass ein Artikel immer nur komplett inkl. seiner Bestandteile disponiert wird. Ist eine Komponente nicht verfügbar, kann der gesamte Artikel nicht berücksichtigt werden.

Als letzter Manageragent tritt der ListManager auf. Diese Klasse von Agen-

ten nimmt nicht nur reine Kontrollfunktionen innerhalb der Simulation wahr, sondern vertritt in den Planungsprozessen das logistische Objekt Veranstaltung als Ganzes. D.h. ein ListManager repräsentiert die in der Grobplanung zusammengestellte Artikelliste und hat die Aufgabe, die konkrete Auswahl der Verleihartikel und die Koordination des Transportes zu überwachen. Entsprechend besitzt er einen ähnlichen Lebenszyklus, wie die Manager für Artikel, Komponenten und Fahrzeuge (Abbildung A.21), hat in den übergreifenden Prozessen jedoch zusätzliches Wissen, bzw. Fähigkeiten, da er nicht nur einen Auswahlprozess, sondern eine Summe von Prozessen auf globaler (Veranstaltungs-)Ebene betrachtet.

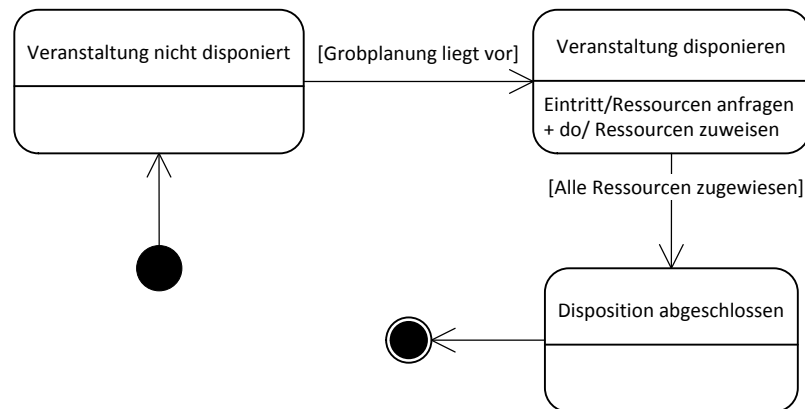


Abbildung A.21: Lebenszyklus des ListManagers

Im Prozess der Artikelanfrage tritt der ListManager beispielsweise als Initiator auf, der die Angebotserstellung anstößt und die Auswahl und abschließende Zuweisung vornimmt (Abbildung A.22). Diese Artikelanfrage führt wiederum zu Anfragen an die Komponenten des Artikels, sofern vorhanden oder wird nach Klärung der technischen und terminlichen Verfügbarkeit an die Fahrzeuge der Transportflotte weitergereicht, um mögliche Transportrouten und die zugehörigen Kosten zu evaluieren (Abbildung A.23).

Abschließend wäre noch der Prozess der Routenplanung zu betrachten (Abbildung A.24). Er ist Teil der Angebotserstellung, wie sie im Rahmen der Fahrzeugauswahl stattfindet. Hier wird, basierend auf den Mechanismen des DLRP die Route für den Transport der Verleihartikel von, zu und zwischen den Ver-

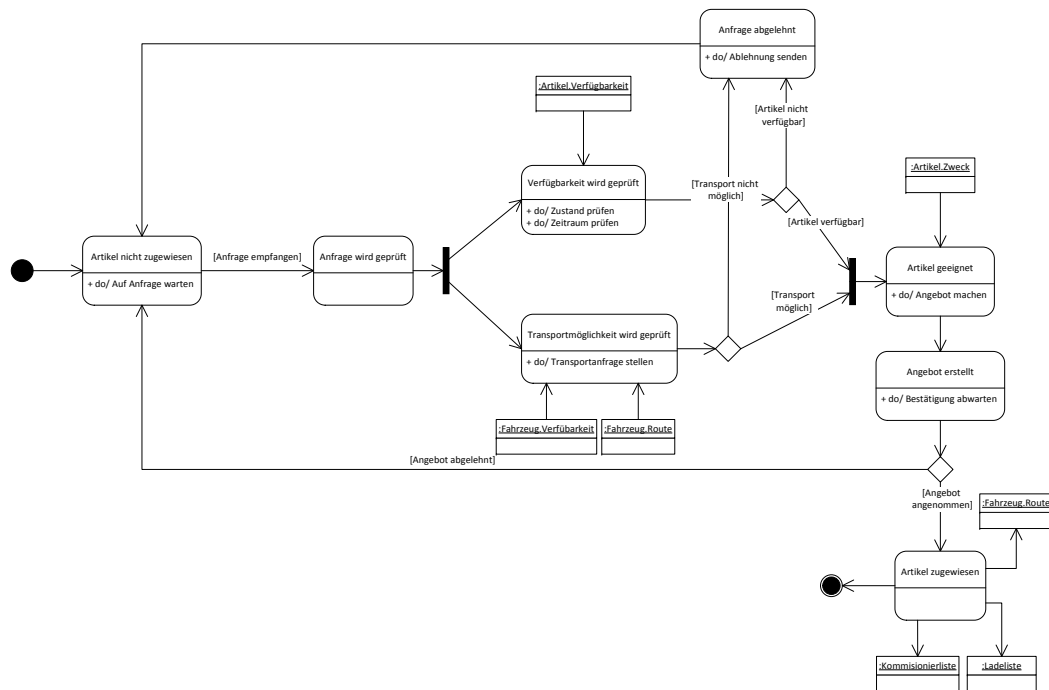


Abbildung A.22: Der Prozess Artikelanfrage

anstellungsstellen geplant. Hinsichtlich der genauen Vorgehensweise und den zugrunde gelegten Kostenfunktionen sei auf die entsprechenden Kapitel Abschnitte in Kapitel 4.5 verwiesen.

Die Prozesse der Personalzuweisung zu Projekten gestalten sich analog zu den Prozessen der Artikel- und Fahrzeugauswahl. Ihnen liegen die Lebenszyklen des logistischen Objekts Mitarbeiter zugrunde, dass analog zu den bereits angeführten Objekten seine Verfügbarkeit und Zuweisung zu Veranstaltungen verwaltet. Die entsprechenden Prozesse und Lebenszyklen wurden zwar modelliert, jedoch in der simulativen Planung mittels PlaSMA nicht vollständig berücksichtigt. Dies liegt darin begründet, dass die Zuweisung von Personal auch im Beispielunternehmen gesondert betrachtet wird. Hier werden nur die Fahrer der Transportfahrzeuge auf Basis Bereits erstellten Routen fest zugewiesen. Das Personal für Aufbau und Abbau von Veranstaltungsausrüstung wird oftmals von den Veranstaltern (speziell auf Messen und Ausstellungen) gestellt und entzieht sich somit der Disposition im Vorfeld. Um dieses Vorgehen in der Praxis zu reflektieren wird nach der Routenerstellung und Fahrzeugzuweisung

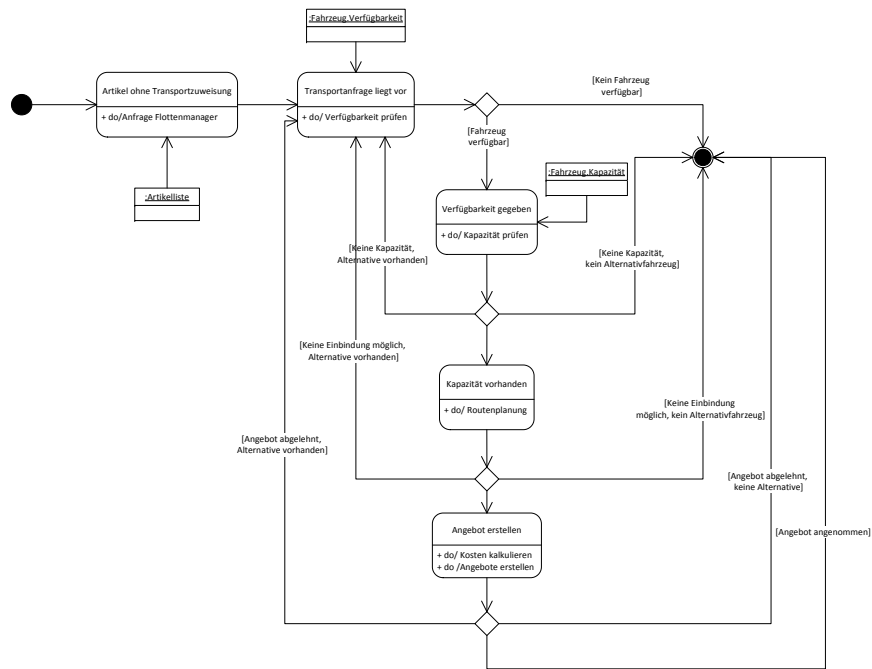


Abbildung A.23: Prozess der Fahrzeugauswahl

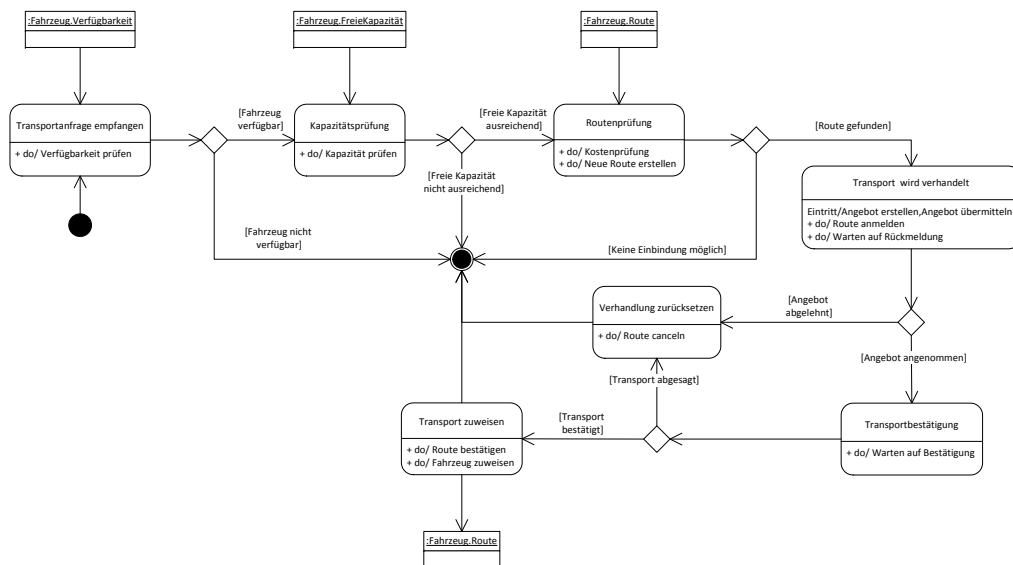


Abbildung A.24: Prozess der Routenplanung in Anlehnung an das DLRP

in PlaSMA ein Post-Processing durchgeführt, dass den Transporten verfügbare Fahrer mit passenden Qualifikationen (Fahrerlaubnis) zuweist, ohne hierbei agentenbasierte Verhandlungen ablaufen zu lassen. Der Vollständigkeit halber

sind die entsprechenden Zyklen und Prozesse im Folgenden abgebildet.

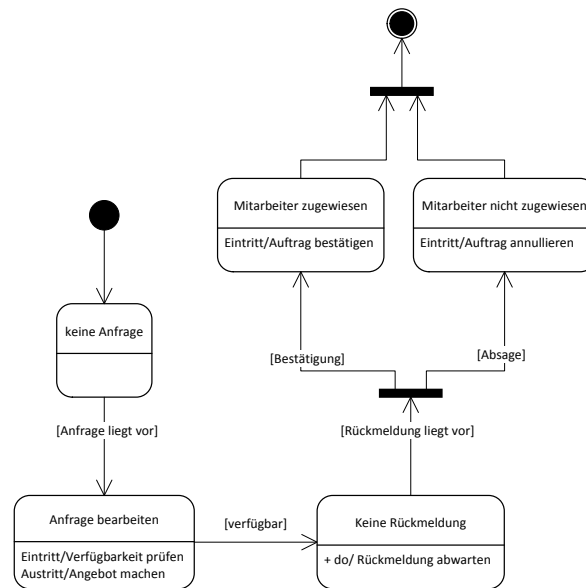


Abbildung A.25: Virtueller Lebenszyklus eines Mitarbeiters

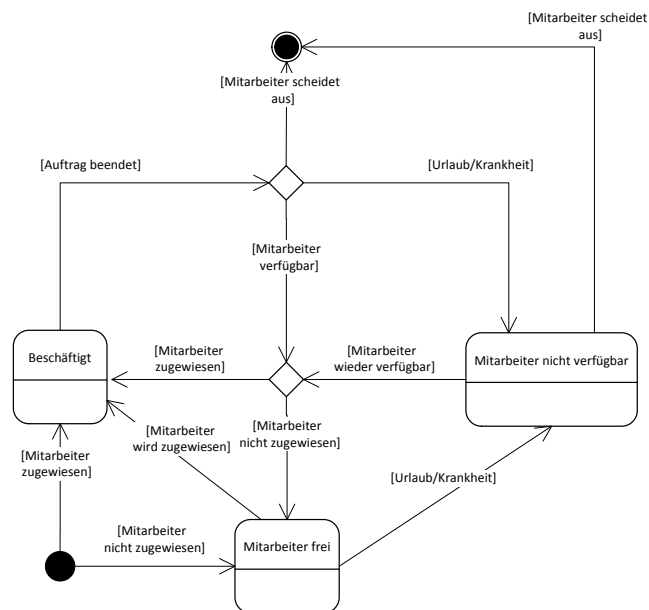


Abbildung A.26: Physischer Lebenszyklus eines Mitarbeiters

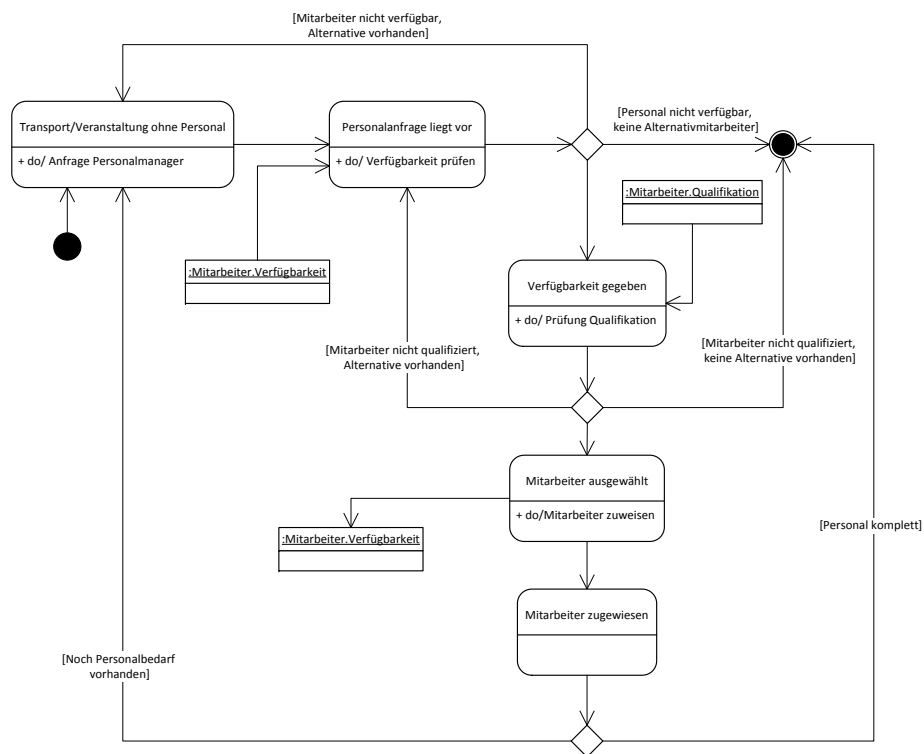


Abbildung A.27: Prozess der Personalauswahl für eine Veranstaltung

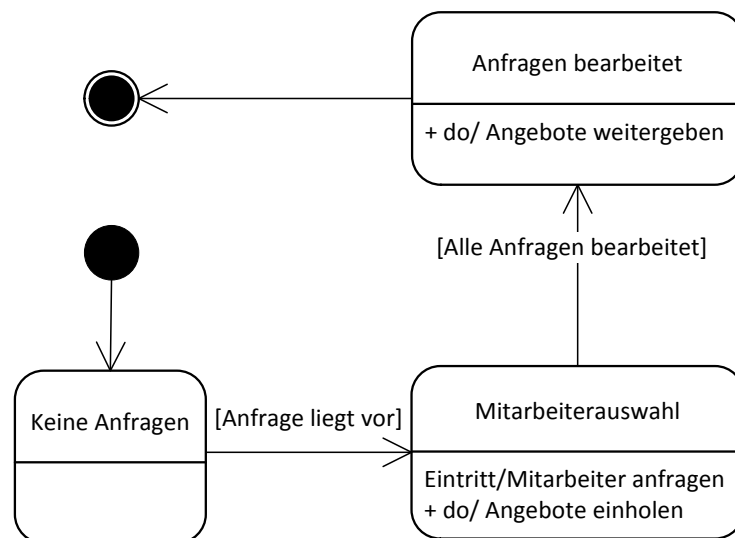


Abbildung A.28: Lebenszyklus des EmployeeManagers

A.2.5 ALEM: Wissenslandkarte

Die folgende Wissenslandkarte stellt das Wissen innerhalb des selbststeuernden Systems sowie seine Verteilung auf die logistischen Objekte dar.

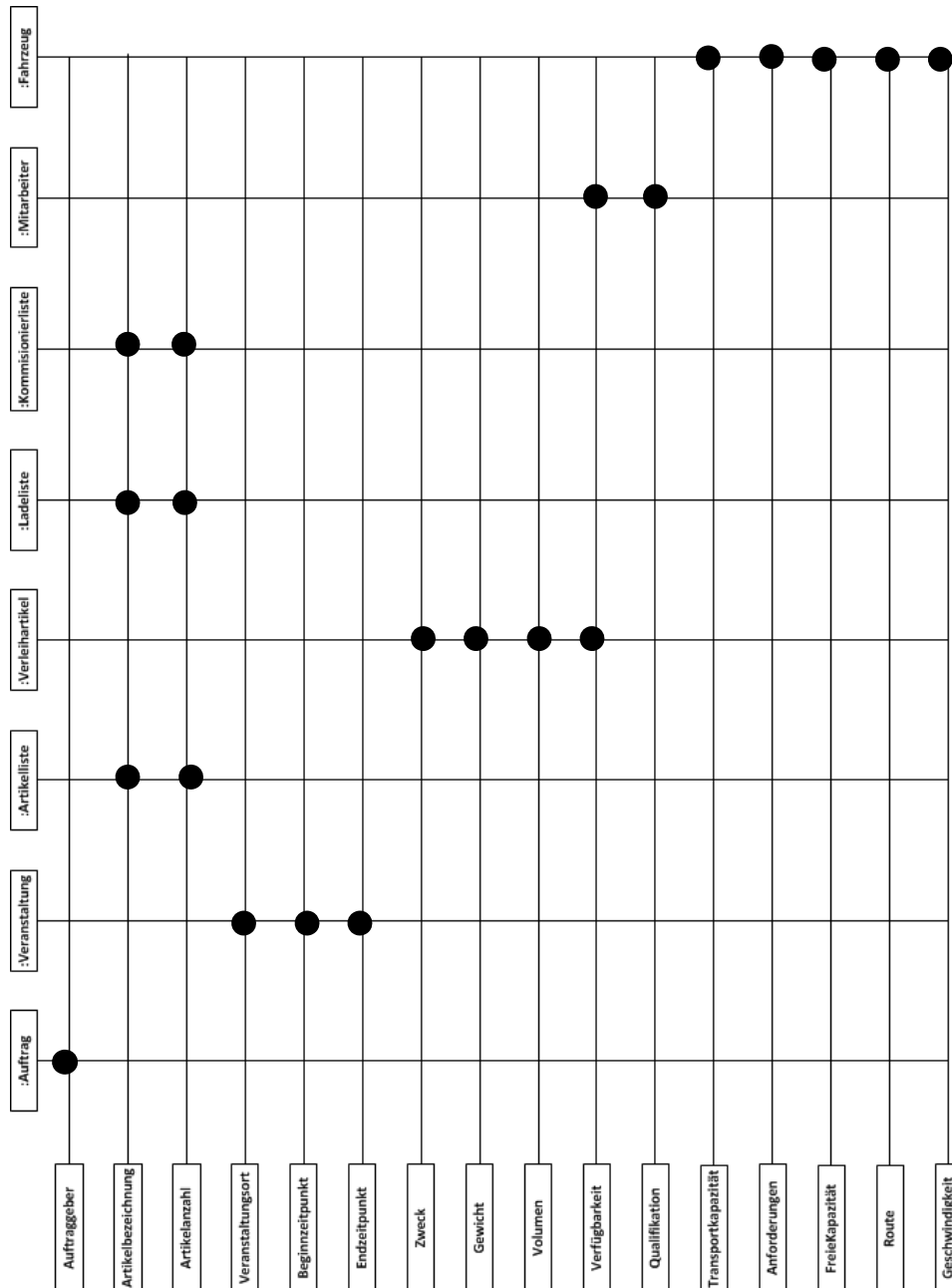


Abbildung A.29: Wissenslandkarte des selbststeuernden Dispositionssystems

A.2.6 ALEM: Kommunikation

Dieser Abschnitt enthält den modellierten Kommunikationsablauf der Objekte aus der Klasse Komponenten, der aus Platzgründen nicht in Kapitel 4.3.7 behandelt werden konnte (Abbildung A.30). Eine Komponente kommuniziert im Rahmen des selbststeuernden Dispositionsprozesses mit dem ihr übergeordneten Verleihartikel sowie dem FleetManager. An den Verleihartikel werden hierbei Angebote und Absagen übermittelt, über den Fleetmanager erfolgt die Kommunikation hinsichtlich möglicher Transportoptionen. Um die Darstellung zu vereinfachen, wird analog zu den Abbildungen in Kapitel 4.3.7 der Zwischenschritt zu übergeordneten Hierarchieebene ausgeblendet.

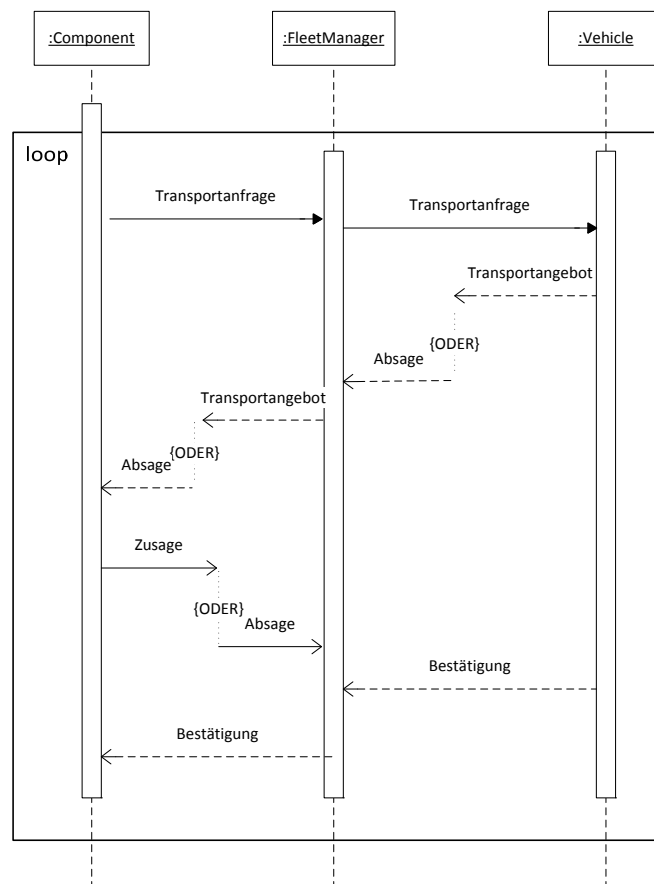


Abbildung A.30: Nachrichtenaustausch der Klasse Komponenten

D.h. die Rückmeldungen hinsichtlich Verfügbarkeit, Transportoptionen oder Zusagen würden von der Komponente an den Verleihartikel weitergegeben.

A.2.7 Konfiguration der Schnittstelle zur Datenbank

Die Datenübertragung zwischen dem Hardwaremodul und der Datenbank des selbststeuernden Dispositionssystems finden über das UMTS-Netz statt. Mittels des FTP-Protokolls wird eine XML-Datei übertragen, deren Inhalte mittels eines Parsers Eingang in die Datenbank finden. Die folgenden Ausschnitte zeigen beispielhaft, wie Materialflussinformationen auf dem Hardwaremodul codiert und übertragen werden. Den Anfang macht die Dokumenttypdefinition (DTD) für die XML-Datei (Codebeispiel A.1).

Listing A.1: Dokumenttypdefinition für die Datenübertragung vom Hardwaremodul

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<!-- ROOT-ELEMENT enthaelt beliebige Anzahl von Datensatzen -->
<!ELEMENT MATTFLUSS (DATENSATZ)*>

<!-- Ein Datensatz enthaelt die Elemente LADERICHTUNG, GPSPOSITION,
      UHRZEIT, Datum und RFIDNUMMER -->
<!ELEMENT DATENSATZ (LADERICHTUNG, GPSPOSITION, RFIDNUMMER, UHRZEIT,
      DATUM)>

<!-- Element GPSPOSITION beinhaltet Elemente LAT und LONG-->
<!ELEMENT POSITION (LAT, LONG)>

<!-- Inhalt der Elemente wird festgelegt (beliebiger Text) -->
<!ELEMENT LADERICHTUNG (#PCDATA)>
<!ELEMENT GPSPOSITION (#PCDATA)>
<!ELEMENT RFIDNUMMER (#PCDATA)>
<!ELEMENT UHRZEIT (#PCDATA)>
<!ELEMENT DATUM (#PCDATA)>

<!-- DATENSATZ wird eine eindeutige ID hinzugefügt und die
      LADERICHTUNG definiert -->
<!ATTLIST DATENSATZ nummer ID #REQUIRED>
<!ATTLIST LADERICHTUNG art (pickup | dropoff)>
```

Die Datei definiert, welche aufgenommenen Informationen in einem Datensatz des Hardwaremoduls enthalten sind. Dies ist die Identifikationsnummer des erfassten Artikels, wie sie auf dem RFID-Tag gespeichert ist, Uhrzeit, Datum und Ort der Ladebewegung (GPS-Position) sowie die Materialflussrichtung. Die RFID-Nummer entspricht hierbei der Artikelnummer in der Bestandsdatenbank des ERP-Systems aus dem Beispielunternehmen.

Das zweite Codebeispiel A.2 auf der nächsten Seite zeigt ein kurzes Beispiel, bei dem je ein Artikel im Abstand von fünf Minuten aus- bzw. eingeladen wird. Beide Ladevorgänge finden am 10.07.2014 in Bremen statt. Die Differenzierung der Laderichtung wird über die Schlüsselbegriffe *pickup* und *dropoff* vorgenommen, wobei Ersteres für ein Beladen und Letzteres für ein Entladen steht.

Diese Informationen werden nun durch den Parser extrahiert und an den entsprechenden Stellen in die Datenbank eingefügt. Die Arbeitsweise des Parsers orientiert sich an der Struktur der Datenbank. Diese ist im Anwendungsfall an die Struktur von EasyJob angelehnt, um eine Teilextraktion der benötigten Daten zu ermöglichen. Entsprechend weisen die Datenbanken für die Simulationskomponente des selbststeuernden Dispositionssystems und EasyJob, zumindest für die dispositionsrelevanten Daten, ähnliche Strukturen auf. Abbildung A.31 zeigt einen Auszug aus der Inventuransicht der Datenbank in EasyJob 4.0.

Nummer	Bezeichnung	Inventar	Vermietinventar
1001123.00	3er Dose outdoor	25	25
1007681.00	3-fach Schukoverteiler	200	200
1000709.00	Acoustic Line TS-Mini Lautsprecher, 150 W RMS, 16 Ohm	60	60
1000718.00	AKG GN-30 Schwanenhalsmikrofon mit Tellerfuß, Hyperniere	4	4
1007728.00	Amp-Rack - 4-Wege Monitor (MX)	1	1
1007626.00	Amp-Rack d&b (C7Top/C4Sub/B2)	2	2
1000713.00	Amp-Rack d&b (C690/C4Sub)	1	1
1007639.00	Amp-Rack d&b 2-Wege Monitoramping aktiv	2	2
1007724.00	Amp-Rack Master	5	5
1007727.00	Amp-Rack Slave	2	2
1001049.00	BNC Videokabel 10m	7	7
1000221.00	C- Haken gerade 20 cm	100	80

Abbildung A.31: Auszug aus der Inventuransicht der EasyJob Datenbank

Listing A.2: Beispieldatensatz

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<!DOCTYPE MATTFLUSS SYSTEM "Matfluss.dtd">
<MATTFLUSS>
  <DATENSATZ nummer="1">
    <GPSPOSITION>
      <LAT>53.1094</LAT>
      <LONG>8.7814</LONG>
    </GPSPOSITION>
    <LADERICHTUNG art="pickup">
      <RFIDNUMMER>
        1001123.00
      </RFIDNUMMER>
      <UHRZEIT>
        11.23
      </UHRZEIT>
      <DATUM>
        10.07.2014
      </DATUM>
    </DATENSATZ>
    <GPSPOSITION>
      <LAT>53.1094</LAT>
      <LONG>8.7814</LONG>
    </GPSPOSITION>
    <LADERICHTUNG art="dropoff">
      <RFIDNUMMER>
        1001019.00
      </RFIDNUMMER>
      <UHRZEIT>
        11.30
      </UHRZEIT>
      <DATUM>
        10.07.2014
      </DATUM>
    </MATTFLUSS>
```

A.3 Ergänzungen zu Kapitel 5

Auswahl der Ladegüter für die Labortests mit dem Hardwaremodul zur Informationsakquise, Ergänzung zu Kapitel 5.1.



Abbildung A.32: Roll Cases unterschiedlicher Größe



Abbildung A.33: Roll Case offen



Abbildung A.34: Bündel Stühle auf Ladungsträger

A.3.1 Testaufbauten

Testszenarien für das Hardwaremodul, Ergänzung zu Kapitel 5.1

Sämtliche Tests werden mit einer Readerleistung von 0,75W durchgeführt. Als Testobjekt dienten beispielsweise Rollwagen (Rollcase), das RFID-Tag ist mittig auf der Oberfläche aufgebracht, die Höhe über Grund beträgt ca. 75cm.

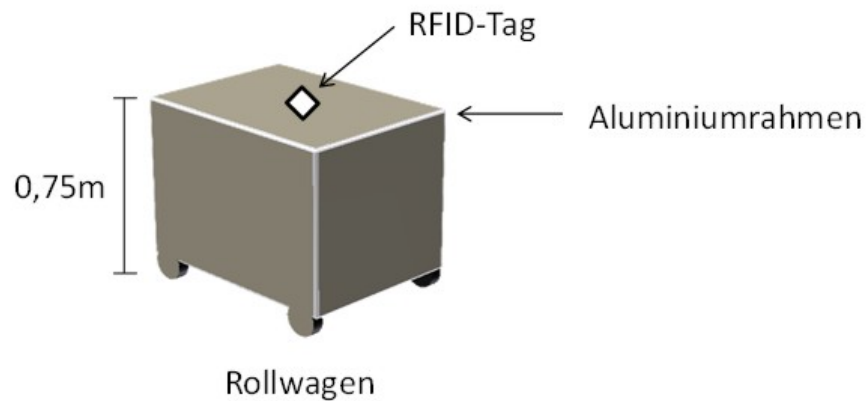


Abbildung A.35: Testobjekt Rollwagen

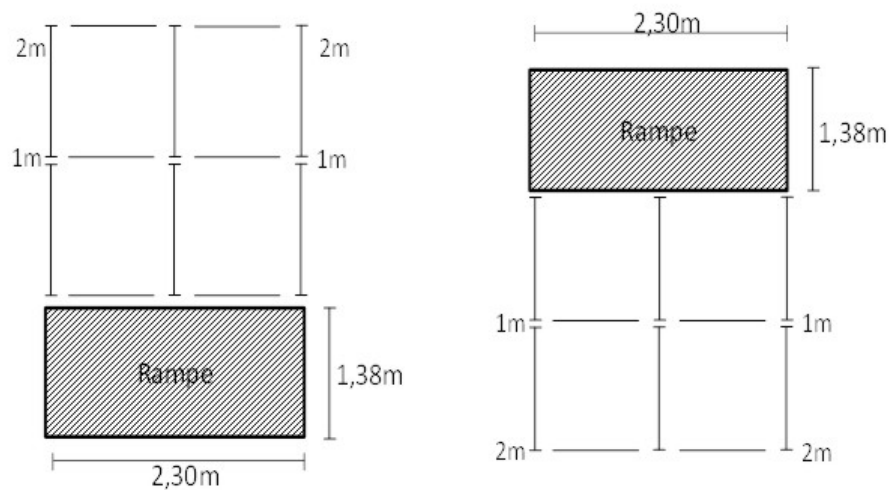


Abbildung A.36: Ladebereiche

Das Testszenario betrachtet jeweils die Laderampe, sowie ein Raster von 2x2 Metern, unterteilt in Abschnitte von je einem Quadratmeter nach innen (Abb.

A.36 links) und außen (Abb. A.36 rechts). Der Rollwagen wird je 5x mit der Längs- und Querseite an den Reader herangeführt, notiert wird die erste Position mit einer zuverlässigen Erkennung. Die Gesamtmaße (Innenmaße) des Ladebereiches und die Position des Moduls sind der folgenden Abbildung zu entnehmen:

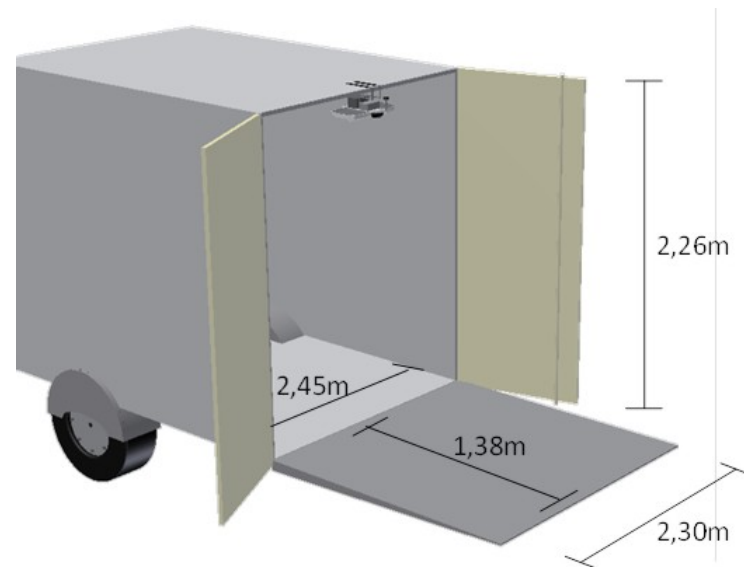


Abbildung A.37: Ladebereich mit Modulposition und Maßen

Testszenario 1: Leseradius außen

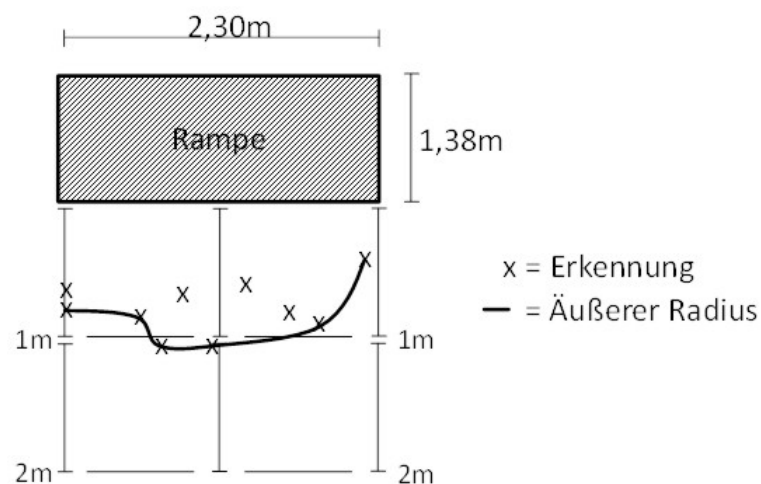


Abbildung A.38: Szenario 1, Leseradius außen

Testszenario 2: Leseradius innen

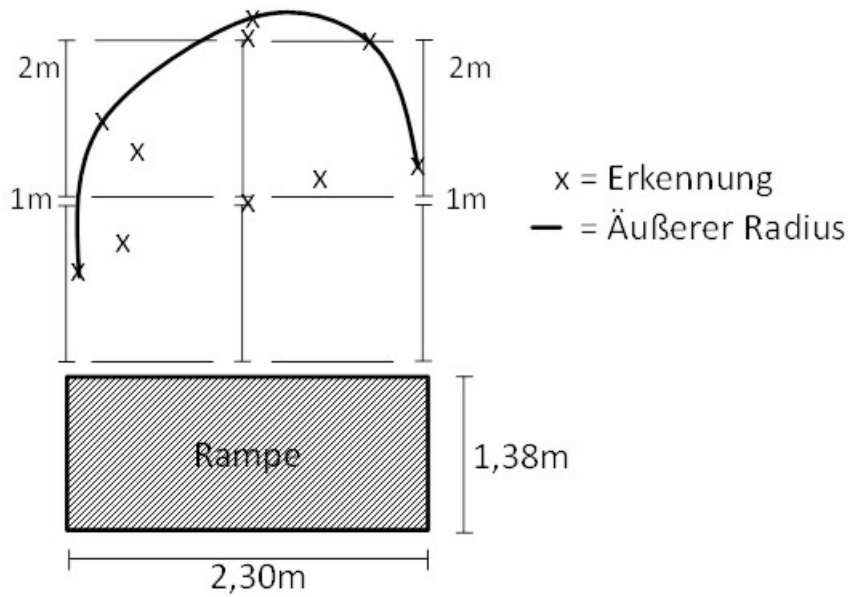


Abbildung A.39: Szenario 2, Leseradius innen

Testszenario 3: Leseradius außen mit Objekten in Reichweite

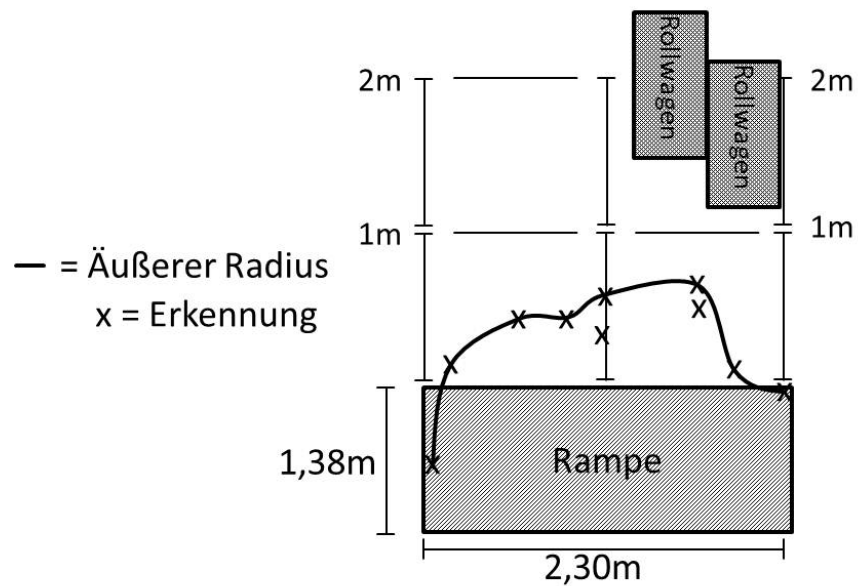


Abbildung A.40: Szenario 3, Leseradius außen mit Objekten in Reichweite

Testszenario 4: Leseradius innen mit Objekten im Fahrzeug

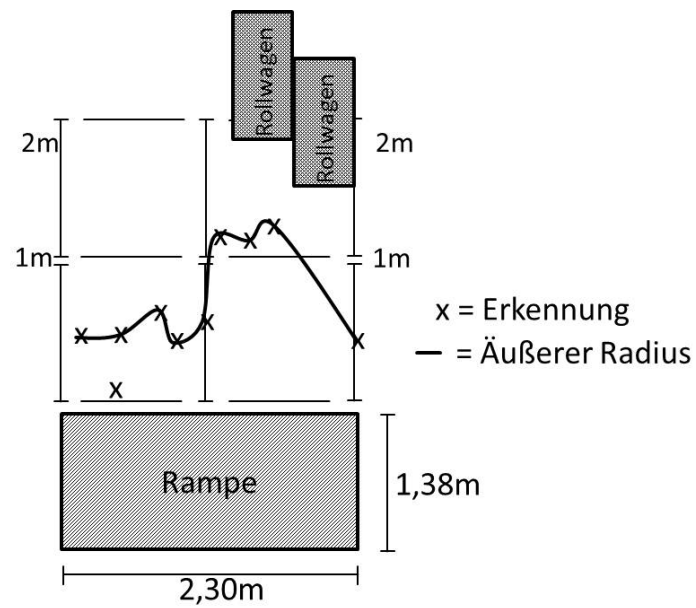


Abbildung A.41: Szenario 4, Leseradius innen mit Objekten im Fahrzeug

Testszenario 5: Leseradius außen mit Objekten im Fahrzeug

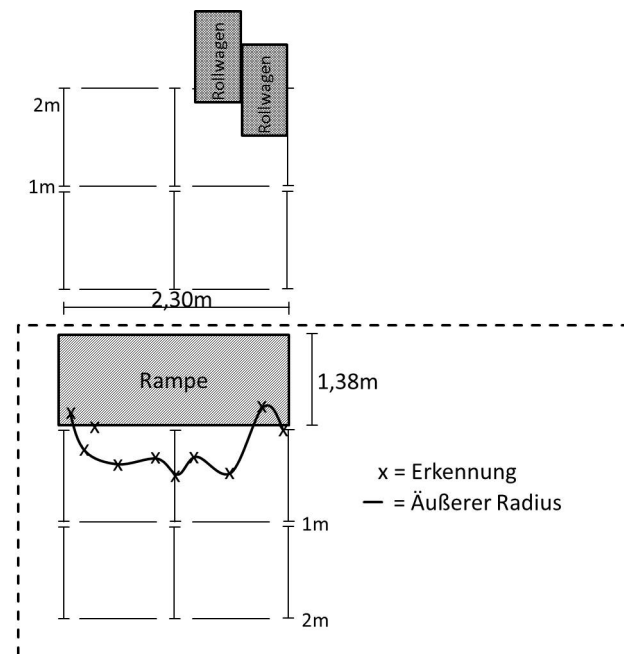


Abbildung A.42: Szenario 5, Leseradius außen mit Objekten im Fahrzeug

Testszenario 6: Leseradius innen mit Objekten in Reichweite

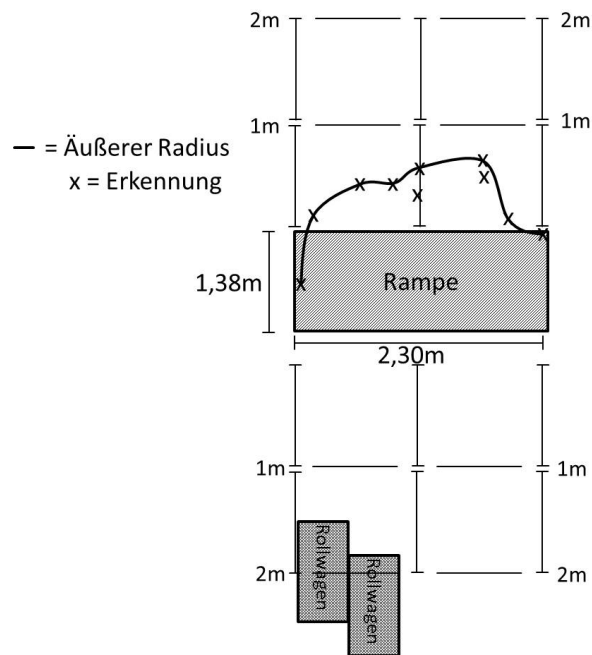


Abbildung A.43: Szenario 6, Leseradius innen mit Objekten in Reichweite

Testszenario 7: Vorbeiführen von Objekten am Fahrzeug

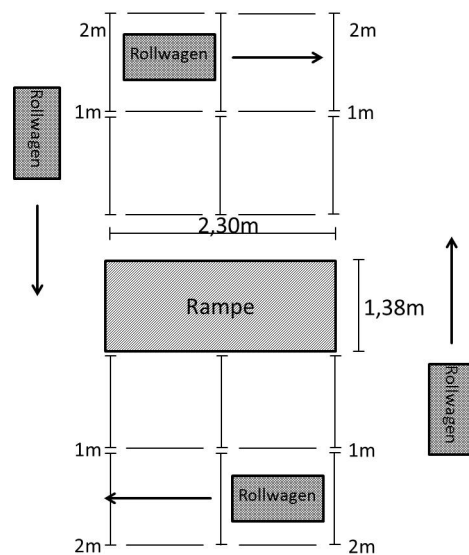


Abbildung A.44: Szenario 7, Vorbeiführen von Objekten am Fahrzeug (Vermeidung von Fehlerfassungen)

A.3.2 Bestimmung der Laderichtung

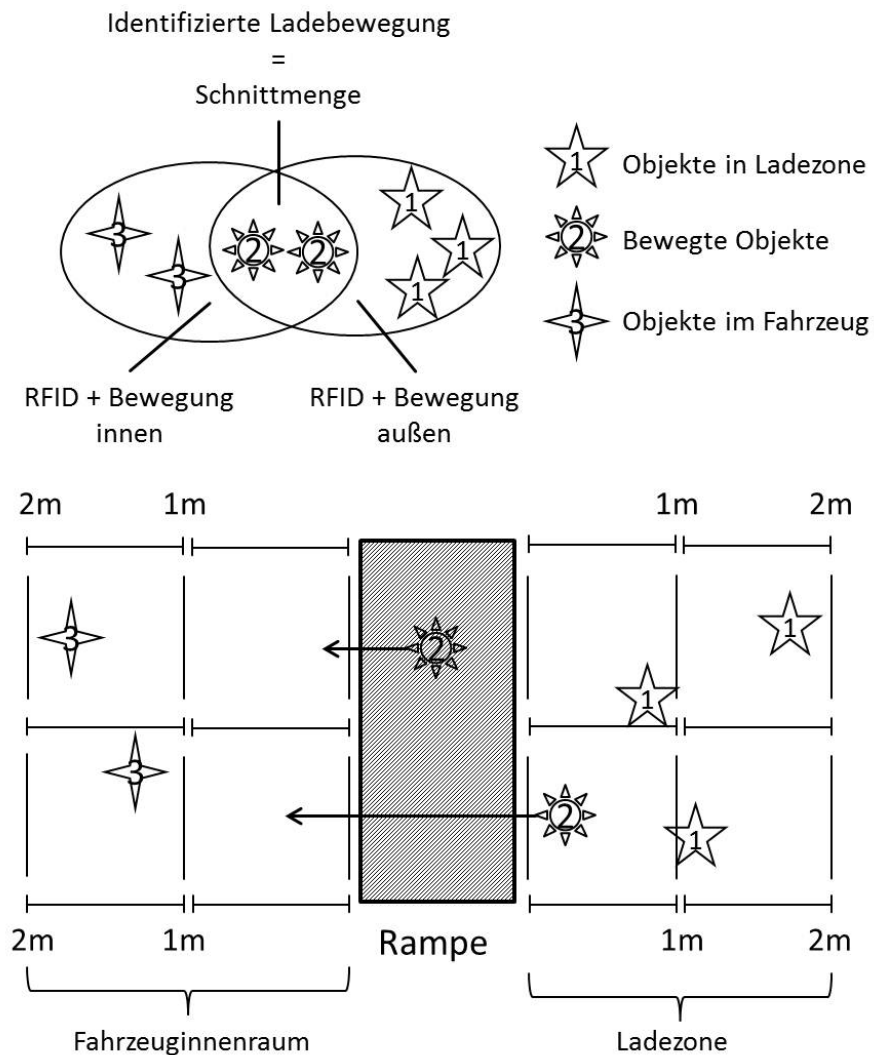


Abbildung A.45: Bestimmung der Laderichtung aus RFID-Erkennung und Bewegungsdetektion

Die Zuordnung von RFID-Erfassung und Bewegungsdetektion zu einer Materialflussbewegung geschieht wie folgt. Wird ein Objekt an das Fahrzeug herangeführt, aktiviert die erkannte Bewegung den RFID-Reader. Dieser erkennt die im Leseradius befindlichen Objekte und ordnet sie vorerst der Ladebewegung zu. Auf der obigen Abbildung löst das Heranführen der Objekte vom Typ 2 die Detektion aus. Da sich neben den tatsächlich bewegten Objekten auch noch andere, vom Typ 1, in Reichweite befinden, werden sie vorerst ebenfalls der

Ladebewegung zugeordnet. Die Objekte vom Typ 2 werden nun über die Rampe in den Laderaum verbracht, wo sich bereits Objekte vom Typ 3 befinden. Diese werden nun ebenfalls vorläufig der Materialbewegung zugeordnet. Die exakte Bestimmung der Ladebewegung wird nun über die Schnittmenge der beiden RFID-Erfassungen gebildet. Diese enthält nur die tatsächlich bewegten Objekte vom Typ 2, da die Objekte vom Typ 1 nur bei der ersten, die vom Typ 3 nur bei der zweiten Detektion erfasst werden. Es ist entsprechend anzunehmen, dass sie sich zwar im Radius der RFID- und Bewegungserkennung befinden, jedoch nicht bewegt werden. Aus der Reihenfolge der erkannten Bewegung wird nun auf die Materialflussrichtung geschlossen, das Beispiel auf der Abbildung A.45 stellt eine Beladung dar, hier wird der äußere Bewegungsmelder vor dem angesprochen, der auf das Fahrzeuginnere abgedeckt ist. Da es in Fällen, in denen das Fahrzeug bis in die Nähe der Rampe beladen ist oder Material dicht vor dem Fahrzeug steht, zu Fehlinterpretationen kommen kann, wird in der Nachbereitung der Datensätze eine Gegenprüfung mit den geplanten Ladebewegungen durchgeführt. Nicht aufgeführte Buchungen werden auf die MDEs des Personals vor Ort zur manuellen Prüfung übermittelt.

A.3.3 Simulationsergebnisse

Dieser Abschnitt des Anhangs enthält die Ergebnisse von Simulationsläufen, die aus Platzgründen nicht in Kapitel 5.2 detailliert betrachtet werden können. Er beinhaltet darüber hinaus noch die Werte, die den Ausführungen im oben genannten Kapitel zugrunde liegen. Die Daten der Ergebnistabellen sind hierbei wie folgt zu verstehen.

- events = Anzahl der Veranstaltungen
- dT/h = Zeitraum zwischen dem Beginn der ersten und dem Ende der letzten Veranstaltung
- requirements = Bedingungen, die bei der Disposition zu erfüllen sind
- overall_km = Gesamtkilometer
- own_xxt = Anzahl der eingesetzten eigenen Fahrzeuge je Klasse
- rental_xxt = Anzahl der eingesetzten Mietfahrzeuge je Klasse
- km_xxt = Kilometer in der jeweiligen Fahrzeugklasse

Steht den oben genannten Werten ein “ref“ oder ein “sa“ vorweg, so handelt es sich um die entsprechenden Werte für die Referenzlösung (Ist-Zustand), bzw. das Simulated Annealing.

events	dTh	articles	requirements	requirements_net	overall	rental	km_3.5	km_7.5	km_40	runtime	ref_overall	ref_rental	ref_km_3.5	ref_km_7.5	ref_km_40	sa_overall	sa_rental	sa_km_3.5	sa_km_7.5	sa_km_40	sa_runtime	
5	201	30	34	246,455	0	12,159	234,296	0	18,48	255,804	0	255,804	0	12,159	243,645	0	255,804	0	12,159	243,645	0	115,978
5	201	30	34	246,455	0	12,159	234,296	0	18,3	255,804	0	255,804	0	12,159	243,645	0	255,804	0	12,159	243,645	0	115,806
5	201	30	34	246,455	0	12,159	234,296	0	18,35	255,804	0	255,804	0	12,159	243,645	0	255,804	0	12,159	243,645	0	116,783
5	201	30	34	246,455	0	12,159	234,296	0	17,68	255,804	0	255,804	0	12,159	243,645	0	255,804	0	12,159	243,645	0	116,246
5	201	30	34	246,455	0	12,159	234,296	0	18,45	255,804	0	255,804	0	12,159	243,645	0	255,804	0	12,159	243,645	0	115,988
5	201	30	34	246,455	0	12,159	234,296	0	17,25	255,804	0	255,804	0	12,159	243,645	0	255,804	0	12,159	243,645	0	115,487
5	201	30	34	246,455	0	12,159	234,296	0	17,3	255,804	0	255,804	0	12,159	243,645	0	255,804	0	12,159	243,645	0	115,867
5	201	30	34	246,455	0	12,159	234,296	0	17,9	255,804	0	255,804	0	12,159	243,645	0	255,804	0	12,159	243,645	0	116,759
10	227	45	58	250,154	0	16,225	233,929	0	27,05	389,357	0	389,357	0	205,203	184,154	0	285,137	0	117,317	167,82	0	211,921
10	227	45	58	250,154	0	16,225	233,929	0	29,33	389,357	0	389,357	0	205,203	184,154	0	285,137	0	117,317	167,82	0	211,511
10	227	45	58	250,154	0	16,225	233,929	0	29,04	389,357	0	389,357	0	205,203	184,154	0	290,516	0	122,696	167,82	0	209,526
10	227	45	58	250,154	0	16,225	233,929	0	28,01	389,357	0	389,357	0	205,203	184,154	0	367,253	0	117,317	249,936	0	233,474
10	227	45	58	250,154	0	16,225	233,929	0	1,05	389,357	0	389,357	0	205,203	184,154	0	370,792	0	196,605	172,347	1,84	190,023
10	227	45	58	250,154	0	16,225	233,929	0	24,29	389,357	0	389,357	0	205,203	184,154	0	286,977	0	119,157	167,82	0	180,023
10	227	45	58	250,154	0	16,225	233,929	0	24,49	389,357	0	389,357	0	205,203	184,154	0	285,137	0	117,317	167,82	0	185,552
10	227	45	58	250,154	0	16,225	233,929	0	26,21	389,357	0	389,357	0	205,203	184,154	0	288,203	0	121,383	167,82	0	189,542
10	227	45	58	250,154	0	16,225	233,929	0	25,44	389,357	0	389,357	0	205,203	184,154	0	285,137	0	117,317	167,82	0	192,337
10	229	45	52	476,972	0	27,991	448,981	0	26,02	731,321	0	731,321	0	223,83	507,491	0	622,989	0	213,248	409,74	0	179,483
10	229	45	52	476,972	0	27,991	448,981	0	23,91	731,321	0	731,321	0	223,83	507,491	0	622,989	0	213,248	409,74	0	179,366
10	229	45	52	476,972	0	27,991	448,981	0	23,92	731,321	0	731,321	0	223,83	507,491	0	622,989	0	213,248	409,74	0	179,002
10	229	45	52	476,972	0	27,991	448,981	0	25,28	731,321	0	731,321	0	223,83	507,491	0	622,989	0	213,248	409,74	0	178,774
10	229	45	52	476,972	0	27,991	448,981	0	23,28	731,321	0	731,321	0	223,83	507,491	0	622,989	0	213,248	409,74	0	178,746
10	229	45	52	476,972	0	27,991	448,981	0	26,44	731,321	0	731,321	0	223,83	507,491	0	622,989	0	213,248	409,74	0	178,985
10	229	45	52	476,972	0	27,991	448,981	0	22,42	731,321	0	731,321	0	223,83	507,491	0	508,086	0	94,004	413,992	0	174,943
10	229	45	52	476,972	0	27,991	448,981	0	23,71	731,321	0	731,321	0	223,83	507,491	0	508,086	0	94,004	413,992	0	179,021
10	229	45	52	476,972	0	27,991	448,981	0	23,17	731,321	0	731,321	0	223,83	507,491	0	508,086	0	94,004	413,992	0	179,117
10	171	45	46	394,623	0	25,376	369,247	0	26,4	495,48	0	495,48	0	240,128	255,352	0	358,243	0	9,676	285,59	62,977	189,687
10	171	45	46	394,623	0	25,376	369,247	0	23,97	495,48	0	495,48	0	240,128	255,352	0	312,577	0	102,951	189,224	20,402	184,276
10	171	45	46	394,623	0	25,376	369,247	0	25,9	495,48	0	495,48	0	240,128	255,352	0	454,486	0	102,951	285,59	65,925	179,527
10	171	45	46	394,623	0	25,376	369,247	0	24,28	495,48	0	495,48	0	240,128	255,352	0	309,629	0	102,951	186,276	20,402	181,413
10	171	45	46	394,623	0	25,376	369,247	0	27,04	495,48	0	495,48	0	240,128	255,352	0	408,943	0	9,676	285,59	113,677	179,805
10	171	45	46	394,623	0	25,376	369,247	0	22,43	495,48	0	495,48	0	240,128	255,352	0	209,626	0	102,951	189,224	20,402	188,175
10	171	45	46	394,623	0	25,376	369,247	0	19,34	495,48	0	495,48	0	240,128	255,352	0	467,6	0	68,333	281,297	11,797	129,203
10	171	45	46	394,623	0	25,376	369,247	0	19,85	495,48	0	495,48	0	240,128	255,352	0	308,365	0	102,951	186,032	20,402	129,203
10	171	45	46	394,623	0	25,376	369,247	0	19,85	495,48	0	495,48	0	240,128	255,352	0	240,846	0	102,951	186,032	20,402	129,203
10	171	45	46	394,623	0	25,376	369,247	0	20,36	495,48	0	495,48	0	240,128	255,352	0	240,846	0	102,951	186,032	20,402	129,203
15	200	52	77	701,882	0	67,937	629,979	4,066	20,38	711,14	0	711,14	0	207,096	504,044	0	623,806	0	206,627	412,139	4,066	252,39
15	200	52	77	701,882	0	67,937	629,979	4,066	30,23	711,14	0	711,14	0	207,096	504,044	0	623,806	0	206,627	412,139	4,066	252,39
15	200	52	77	701,882	0	67,937	629,979	4,066	26,71	711,14	0	711,14	0	207,096	504,044	0	618,966	0	206,627	412,139	0	249,062
15	200	52	77	701,882	0	67,937	629,979	4,066	30,57	711,14	0	711,14	0	207,096	504,044	0	618,966	0	206,627	412,139	0	250,603
15	200	52	77	701,882	0	67,937	629,979	4,066	29,74	711,14	0	711,14	0	207,096	504,044	0	618,966	0	206,627	412,139	0	248,099
15	200	52	77	701,882	0	67,937	629,979	4,066	28,41	711,14	0	711,14	0	207,096	504,044	0	618,966	0	206,627	412,139	0	247,798
15	200	52	77	701,882	0	67,937	629,979	4,066	28,45	711,14	0	711,14	0	207,096	504,044	0	620,806	0	206,627	412,139	1,84	250,732
15	200	52	77	701,882	0	67,937	629,979	4,066	30,84	711,14	0	711,14	0	207,096	504,044	0	618,966	0	206,627	412,139	0	248,958
15	200	52	77	701,882	0	67,937	629,979	4,066	28,43	711,14	0	711,14	0	207,096	504,044	0	618,966	0	206,627	412,139	0	253,365
15	200	52	77	701,882	0	67,937	629,979	4,066	28,73	711,14	0	711,14	0	207,096	504,044	0	618,966	0	206,627	412,139	0	243,962
20	230	65	118	870,357	0	97,395	741,336	31,626	36,23	1328,37	12,415	542,826	785,546	0	1190,52	370,116	820,401	0	236,067	0	236,067	0
20	230	65	118	870,357	0	97,395	741,336	31,626	38,27	1328,37	12,415	542,826	785,546	0	1190,52	370,116	820,401	0	236,067	0	236,067	0
20	230	65	118	870,357	0	97,395	741,336	31,626	37,29	1328,37	12,415	542,826	785,546	0	121,53	370,116	820,401	0	236,067	0	236,067	0
20	230	65	118	870,357	0	97,395	741,336	31,626	35,75	1328,37	12,415	542,826	785,546	0	1115,82	370,116	820,401	0				

events	dT/h	articles	requirements	requirements_met	overall_km	rental_km	km_3.5t	km_7.5t	km_40t	runtime	ref_overall_km	ref_rental_km	ref_km_3.5	ref_km_7.5	ref_km_40	sa_overall_km	sa_rental_km	sa_km_3.5	sa_km_7.5	sa_km_40	sa_runtime
30	219	90	166	1665.43	4.066	235.142	1303.659	126.629	51.12	2404.85	48.64	48.64	1323.49	1022.7	58.657	3099.36	1.84	464.292	2052.68	582.389	479.237
30	219	90	166	1665.43	4.066	235.142	1303.659	126.629	48.2	2404.85	48.64	48.64	1323.49	1022.7	58.657	3120.14	0	378.905	2361.02	380.221	466.889
30	219	90	166	1665.43	4.066	235.142	1303.659	126.629	50.62	2404.85	48.64	48.64	1323.49	1022.7	58.657	3141.52	0	475.898	2098.05	567.569	469.611
30	219	90	166	1665.43	4.066	235.142	1303.659	126.629	53.36	2404.85	48.64	48.64	1323.49	1022.7	58.657	3326.22	1.84	583.858	2145.29	597.073	477.328
30	219	90	166	1665.43	4.066	235.142	1303.659	126.629	50.79	2404.85	48.64	48.64	1323.49	1022.7	58.657	3003.51	0	462.493	2172.1	376.921	475.277
30	219	90	166	1665.43	4.066	235.142	1303.659	126.629	53.13	2404.85	48.64	48.64	1323.49	1022.7	58.657	3284.89	0	549.599	2159.35	575.934	473.959
30	219	90	166	1665.43	4.066	235.142	1303.659	126.629	53.13	2404.85	48.64	48.64	1323.49	1022.7	58.657	3234.75	0	492.872	2560.77	178.109	473.758
30	219	90	166	1665.43	4.066	235.142	1303.659	126.629	49.07	2404.85	48.64	48.64	1323.49	1022.7	58.657	3127.7	0	300.039	2423.69	403.978	490.359
30	219	90	166	1665.43	4.066	235.142	1303.659	126.629	52.07	2404.85	48.64	48.64	1323.49	1022.7	58.657	3393.93	0	616.551	2307.61	469.771	489.933
30	219	90	166	1665.43	4.066	235.142	1303.659	126.629	47.08	2404.85	48.64	48.64	1323.49	1022.7	58.657	3091.27	0	486.91	2347.95	256.412	487.309
35	228	70	192	2113.187	16.225	395.273	1622.614	95.3	45.39	2598.35	60.799	1103.41	1183.38	1183.38	311.56	3938.03	0	924.236	2514.28	499.512	629.155
35	228	70	192	2113.187	16.225	395.273	1622.614	95.3	45.39	2598.35	60.799	1103.41	1183.38	1183.38	311.56	4076.55	1.84	585.531	2924.85	668.167	614.135
35	228	70	192	2113.187	16.225	395.273	1622.614	95.3	46.86	2598.35	60.799	1103.41	1183.38	1183.38	311.56	4139.1	0	866.199	2357.34	915.563	682.246
35	228	70	192	2113.187	16.225	395.273	1622.614	95.3	47.91	2598.35	60.799	1103.41	1183.38	1183.38	311.56	4213.51	0	1018.09	2730.49	464.934	628.536
35	228	70	192	2113.187	16.225	395.273	1622.614	95.3	47.82	2598.35	60.799	1103.41	1183.38	1183.38	311.56	3722	0	802.565	2422.32	487.122	730.114
35	228	70	192	2113.187	16.225	395.273	1622.614	95.3	46.07	2598.35	60.799	1103.41	1183.38	1183.38	311.56	3625.51	0	662.588	2191.57	771.361	780.946
35	228	70	192	2113.187	16.225	395.273	1622.614	95.3	44.77	2598.35	60.799	1103.41	1183.38	1183.38	311.56	3761.84	65.695	905.681	2110.97	745.19	782.563
35	228	70	192	2113.187	16.225	395.273	1622.614	95.3	44.77	2598.35	60.799	1103.41	1183.38	1183.38	311.56	3894.97	0	679.588	2403.34	812.046	849.466
35	228	70	192	2113.187	16.225	395.273	1622.614	95.3	47.63	2598.35	60.799	1103.41	1183.38	1183.38	311.56	3844.96	0	573.716	2470.43	800.814	843.864
35	228	70	192	2113.187	16.225	395.273	1622.614	95.3	47.37	2598.35	60.799	1103.41	1183.38	1183.38	311.56	4275.98	0	1027.86	2740.7	507.416	772.895
40	230	120	206	2291.96	4.066	404.227	1798.334	89.389	57.34	2872.21	106.357	1666.95	1666.95	792.87	212.389	3577.38	59.359	904.646	2329.29	343.449	671.512
40	230	120	206	2291.96	4.066	404.227	1798.334	89.389	57.61	2872.21	106.357	1666.95	1666.95	792.87	212.389	3169.15	53.163	999.98	1937	232.171	677.543
40	230	120	206	2291.96	4.066	404.227	1798.334	89.389	57.61	2872.21	106.357	1666.95	1666.95	792.87	212.389	3484.17	0	943.333	2319.95	220.887	676.209
40	230	120	206	2291.96	4.066	404.227	1798.334	89.389	58.9	2872.21	106.357	1666.95	1666.95	792.87	212.389	4044.42	105.689	1075.94	2717.5	250.981	661.516
40	230	120	206	2291.96	4.066	404.227	1798.334	89.389	57.07	2872.21	106.357	1666.95	1666.95	792.87	212.389	3419.56	0	1125	2022.09	272.469	675.441
40	230	120	206	2291.96	4.066	404.227	1798.334	89.389	55.87	2872.21	106.357	1666.95	1666.95	792.87	212.389	3342.61	106.357	951.262	2173.71	217.639	666.898
40	230	120	206	2291.96	4.066	404.227	1798.334	89.389	58.68	2872.21	106.357	1666.95	1666.95	792.87	212.389	3422.54	106.357	739.306	2423.84	259.388	665.535
40	230	120	206	2291.96	4.066	404.227	1798.334	89.389	57.47	2872.21	106.357	1666.95	1666.95	792.87	212.389	3695.03	106.357	1038.84	2396.27	259.914	667.203
40	230	120	206	2291.96	4.066	404.227	1798.334	89.389	59.31	2872.21	106.357	1666.95	1666.95	792.87	212.389	3426.99	106.357	1162.48	2068.58	195.926	686.529
40	230	120	206	2291.96	4.066	404.227	1798.334	89.389	57.6	2872.21	106.357	1666.95	1666.95	792.87	212.389	3523.55	53.163	764.059	2529.29	230.202	678.515
45	229	200	278	1379.09	0	24.83	1338.035	16.225	191.68	3013.09	0	95.8	2917.29	0	95.8	7678.55	0	45.218	7227.44	405.696	1443.62
45	229	200	278	1379.09	0	24.83	1338.035	16.225	188.48	3013.09	0	95.8	2917.29	0	95.8	8235.99	0	240.751	7741.97	253.272	1449.81
45	229	200	278	1379.09	0	24.83	1338.035	16.225	202.07	3013.09	0	95.8	2917.29	0	95.8	6460.09	1.84	212.001	6007.53	240.554	1446.57
45	229	200	278	1379.09	0	24.83	1338.035	16.225	190.36	3013.09	0	95.8	2917.29	0	95.8	6866.77	0	24.24	6489.12	353.416	1482.94
45	229	200	278	1379.09	0	24.83	1338.035	16.225	183.88	3013.09	0	95.8	2917.29	0	95.8	7860.1	0	248.128	7588.04	254.012	1431.27
45	229	200	278	1379.09	0	24.83	1338.035	16.225	181.48	3013.09	0	95.8	2917.29	0	95.8	8440.95	0	54.179	8114.14	272.528	1438.35
45	229	200	278	1379.09	0	24.83	1338.035	16.225	180.29	3013.09	0	95.8	2917.29	0	95.8	7087.36	0	135.267	6573.21	378.877	1425.14
45	229	200	278	1379.09	0	24.83	1338.035	16.225	187.07	3013.09	0	95.8	2917.29	0	95.8	7716.51	0	46.117	7987.46	272.935	1439.92
45	229	200	278	1379.09	0	24.83	1338.035	16.225	183.37	3013.09	0	95.8	2917.29	0	95.8	7603.5	0	56.912	7261.99	284.602	1413.82
45	229	200	278	1379.09	0	24.83	1338.035	16.225	189.43	3013.09	0	95.8	2917.29	0	95.8	7373.58	1.84	117.954	6821.24	434.385	1429.1
45	230	165	227	1373.823	0	24.574	1345.183	4.066	91.57	3378.51	0	131.57	3247.94	0	131.57	4452.14	0	153.003	4036.19	262.95	782.519
45	230	165	227	1373.823	0	24.574	1345.183	4.066	86.4	3378.51	0	131.57	3247.94	0	131.57	5012.25	0	3.68	5255.73	152.841	763.237
45	230	165	227	1373.823	0	24.574	1345.183	4.066	89.91	3378.51	0	131.57	3247.94	0	131.57	5035.19	0	129.026	4650.23	255.93	791.704
45	230	165	227	1373.823	0	24.574	1345.183	4.066	93.14	3378.51	0	131.57	3247.94	0	131.57	5245.24	0	235.561	4843.87	166.805	778.613
45	230	165	227	1373.823	0	24.574	1345.183	4.066	91.06	3378.51	0	131.57	3247.94	0	131.57	4883.74	0	240.779	4381.64	261.326	729.19
45	230	165	227	1373.823	0	24.574	1345.183	4.066	94.85	3378.51	0	131.57	3247.94	0	131.57	5183.07	0	59.739	4901.63	219.698	782.62
45	230	165	227	1373.823	0	24.574	1345.183	4.066	90.37	3378.51	0	131.57	3247.94	0	131.57	5288.13	0	240.222	4828.66	212.252	768.816
45	230	165	227	1373.823	0	24.574	1345.183	4.066	86.12	3378.51	0	131.57	3247.94	0	131.57	5249.31	0	61.579	4826.05	259.685	771.667
45	230	165	227	1373.823	0	24.574	1345.183	4.066	91.65	3378.51	0	131.57	3247.94	0	131.57	5367.43	0	122.233	4873.23	371.969	743.112
45	230	165	227	1373.823	0	24.574	1345.183	4.066	93.52	3378.51	0	131.57	3247.94	0	131.57	5670	0	246.114	5327.55	96.335	755.637
50	227	200	322	1295.924	0	24.574	1267.284	4.066	171.72	3551.13	0	239.518	3234.93	76.684	7719.91	5.906	317.537	6919.36	483.007	1296.46	1296.46
50	227	200	322	1295.924	0	24.574	1267.284	4.066	172.03	3551.13	0	239.518	3234.93	76.684	9766.01	1.84	304.146	8849.88	611.982	1305.51	1305.51
5																					

events	dT/h	articles	requirements	requirements_met	weight_kM	rental_kM	km_3.5t	km_7.5t	km_40t	runtime	ref_overall_kM	ref_rental_kM	ref_kM_3.5	ref_kM_7.5	ref_kM_40	sa_overall_kM	sa_rental_kM	sa_kM_3.5	sa_kM_7.5	sa_kM_40	sa_runtime
5	205	500	27	30155,26	0	0	0	226,237	0	44,04	479,831	0	0	479,831	0	404,954	0	0	404,954	0	182,407
5	205	500	27	30155,26	0	0	0	226,237	0	45,87	479,831	0	0	479,831	0	261,473	0	0	261,473	0	167,744
5	205	500	27	30155,26	0	0	0	226,237	0	47,35	479,831	0	0	479,831	0	328,346	0	0	328,346	0	168,407
5	205	500	27	30155,26	0	0	0	226,237	0	45,25	479,831	0	0	479,831	0	267,804	0	0	267,804	0	167,973
5	205	500	27	30155,26	0	0	0	226,237	0	45,8	479,831	0	0	479,831	0	269,208	0	0	269,208	0	174,061
5	205	500	27	30155,26	0	0	0	226,237	0	46,24	479,831	0	0	479,831	0	269,208	0	0	269,208	0	169,713
5	205	500	27	30155,26	0	0	0	226,237	0	44,74	479,831	0	0	479,831	0	267,804	0	0	267,804	0	165,889
5	205	500	27	30155,26	0	0	0	226,237	0	46,21	479,831	0	0	479,831	0	226,237	0	0	226,237	0	167,876
5	205	500	27	30155,26	0	0	0	226,237	0	45,27	479,831	0	0	479,831	0	328,158	0	0	328,158	0	160,574
5	205	500	27	30155,26	0	0	0	226,237	0	46,26	479,831	0	0	479,831	0	300,093	0	0	300,093	0	162,222
10	202	1000	60	55240,298	0	0	0	354,827	0	79,99	493,019	0	0	493,019	0	525,704	0	0	517,954	0	341,134
10	202	1000	60	55240,298	0	0	0	354,827	0	76,56	493,019	0	0	493,019	0	450,187	0	0	344,062	0	106,125
10	202	1000	60	55240,298	0	0	0	354,827	0	79,46	493,019	0	0	493,019	0	670,363	0	0	662,613	0	337,628
10	202	1000	60	55240,298	0	0	0	354,827	0	82,7	493,019	0	0	493,019	0	577,197	0	0	569,447	0	340,161
10	202	1000	60	55240,298	0	0	0	354,827	0	76,28	493,019	0	0	493,019	0	545,468	0	0	537,718	0	344,466
10	202	1000	60	55240,298	0	0	0	354,827	0	75,55	493,019	0	0	493,019	0	516,596	0	7,75	508,846	0	343,43
10	202	1000	60	55240,298	0	0	0	354,827	0	76,11	493,019	0	0	493,019	0	382,639	0	0	374,889	0	341,197
10	202	1000	60	55240,298	0	0	0	354,827	0	76,32	493,019	0	0	493,019	0	634,352	0	7,75	603,019	0	23,583
10	202	1000	60	55240,298	0	0	0	354,827	0	81	493,019	0	0	493,019	0	541,513	0	0	484,908	0	56,605
10	202	1000	60	55240,298	0	0	0	354,827	0	80,48	493,019	0	0	493,019	0	581,691	0	23,583	550,358	0	331,857
15	166	1500	95	143281,802	0	0	0	4,066 647,135	0	92,25	985,291	0	12,415	972,876	0	883,779	0	49,661	703,799	130,319	608,602
15	166	1500	95	143281,802	0	0	0	4,066 647,135	0	110,25	985,291	0	12,415	972,876	0	902,946	0	5,906	892,974	4,066	559,784
15	166	1500	95	143281,802	0	0	0	4,066 647,135	0	105,65	985,291	0	12,415	972,876	0	832,627	0	65,588	762,973	4,066	572,476
15	166	1500	95	143281,802	0	0	0	4,066 647,135	0	107,47	985,291	0	12,415	972,876	0	1013,42	0	5,906	883,806	123,711	568,051
15	166	1500	95	143281,802	0	0	0	4,066 647,135	0	105,43	985,291	0	12,415	972,876	0	747,08	0	8,132	615,237	123,711	560,131
15	166	1500	95	143281,802	0	0	0	4,066 647,135	0	108,98	985,291	0	12,415	972,876	0	677,537	0	49,661	504,165	123,711	551,82
15	166	1500	95	143281,802	0	0	0	4,066 647,135	0	104,95	985,291	0	12,415	972,876	0	865,23	0	167,647	685,941	11,642	554,028
15	166	1500	95	143281,802	0	0	0	4,066 647,135	0	107,77	985,291	0	12,415	972,876	0	860,214	0	1,84	763,753	94,621	554,101
15	166	1500	95	143281,802	0	0	0	4,066 647,135	0	107,44	985,291	0	12,415	972,876	0	921,808	4,066	107,117	684,372	130,319	553,669
15	166	1500	95	143281,802	0	0	0	4,066 647,135	0	106,92	985,291	0	12,415	972,876	0	892,483	0	5,906	784,38	102,197	551,458
20	198	2000	132	245861,57	0	0	0	16,225 836,595	0	140,1	1390,35	0	154,997	1235,36	0	1691,22	0	88,843	1327,33	275,053	825,86
20	198	2000	132	245861,57	0	0	0	16,225 836,595	0	140,58	1390,35	0	154,997	1235,36	0	1437,47	0	194,325	1150,24	92,908	818,54
20	198	2000	132	245861,57	0	0	0	16,225 836,595	0	135,46	1390,35	0	154,997	1235,36	0	1595,74	0	50,48	1387,61	157,654	830,686
20	198	2000	132	245861,57	0	0	0	16,225 836,595	0	18,68	1390,35	0	154,997	1235,36	0	1566,47	0	52,706	1356,88	156,879	835,378
20	198	2000	132	245861,57	0	0	0	16,225 836,595	0	138,42	1390,35	0	154,997	1235,36	0	1568,97	0	197,672	1261,41	109,895	838,977
20	198	2000	132	245861,57	0	0	0	16,225 836,595	0	136,65	1390,35	0	154,997	1235,36	0	1584,52	0	163,57	1232,5	188,442	823,042
20	198	2000	132	245861,57	0	0	0	16,225 836,595	0	139,87	1390,35	0	154,997	1235,36	0	1261,46	0	172,973	906,574	181,913	829,8
20	198	2000	132	245861,57	0	0	0	16,225 836,595	0	17,97	1390,35	0	154,997	1235,36	0	1607,38	0	207,849	1262,78	186,746	829,588
20	198	2000	132	245861,57	0	0	0	16,225 836,595	0	142,01	1390,35	0	154,997	1235,36	0	1265,02	0	200,841	996,386	67,797	829,908
20	198	2000	132	245861,57	0	0	0	16,225 836,595	0	140,01	1390,35	0	154,997	1235,36	0	1444,89	1,84	192,709	1055,65	196,326	825,129

Abbildung A.48: Ergebnisübersicht für die Simulationsstudien, Teil 3

5	225	988	158	4465.103	431.949	0	0	431.949	0	133.71	521.289	6721.22	302015	0	1397.18	0	230.962	924.182	242.033	630.542
5	225	988	158	4465.103	431.949	0	0	431.949	0	137.12	521.289	6721.22	302015	0	1094	0	87.537	764.435	242.033	512.275
5	225	988	158	4465.103	431.949	0	0	431.949	0	154.27	521.289	6721.22	302015	0	1349.95	0	285.665	761.245	303.043	489.482
5	225	988	158	4465.103	431.949	0	0	431.949	0	151.49	521.289	6721.22	302015	0	1232.41	0	252.998	737.375	242.033	482.82
5	225	988	158	4465.103	431.949	0	0	431.949	0	155	521.289	6721.22	302015	0	1258.25	0	216.876	738.336	303.043	490.729
5	225	988	158	4465.103	431.949	0	0	431.949	0	149.64	521.289	6721.22	302015	0	1469.71	0	303.495	924.182	242.033	489.073
5	225	988	158	4465.103	431.949	0	0	431.949	0	154.38	521.289	6721.22	302015	0	1275.36	0	109.141	863.172	303.043	491.832
5	225	988	158	4465.103	431.949	0	0	431.949	0	149.1	521.289	6721.22	302015	0	1355.95	0	189.739	924.182	242.033	522.501
5	225	988	158	4465.103	431.949	0	0	431.949	0	140.13	521.289	6721.22	302015	0	1274.59	0	169.385	802.162	303.043	517.965
5	225	988	158	4465.103	431.949	0	0	431.949	0	152.8	521.289	6721.22	302015	0	1418.37	0	281.067	895.272	242.033	506.906
10	223	1989	276	10341.57	917.641	0	24.83	892.811	0	239.61	688.538	4872.09	213958	0	2404.39	521.313	312.576	1834.83	256.979	1013.57
10	223	1989	276	10341.57	917.641	0	24.83	892.811	0	226.32	688.538	4872.09	213958	0	2806.55	294.502	576.68	1905.52	322.358	1029.23
10	223	1989	276	10341.57	917.641	0	24.83	892.811	0	224.41	688.538	4872.09	213958	0	2964.48	302.82	835.394	1843.57	285.513	1015.65
10	223	1989	276	10341.57	917.641	0	24.83	892.811	0	229.69	688.538	4872.09	213958	0	2912.88	127.192	441.275	1889.15	582.452	1033.26
10	223	1989	276	10341.57	917.641	0	24.83	892.811	0	17.77	688.538	4872.09	213958	0	2759.69	395.391	449.095	1958.03	352.665	1026.31
10	223	1989	276	10341.57	917.641	0	24.83	892.811	0	223.91	688.538	4872.09	213958	0	2824.34	472.393	650.59	2031.55	133.207	1013.39
10	223	1989	276	10341.57	917.641	0	24.83	892.811	0	18.02	688.538	4872.09	213958	0	2382.93	475.546	577.816	1559.56	275.559	1019.33
10	223	1989	276	10341.57	917.641	0	24.83	892.811	0	17.86	688.538	4872.09	213958	0	2630.74	312.704	580.047	1766.73	343.97	1021.81
10	223	1989	276	10341.57	917.641	0	24.83	892.811	0	240.51	688.538	4872.09	213958	0	2711.68	314.674	448.064	1968.14	289.485	1006.97
10	223	1989	276	10341.57	917.641	0	24.83	892.811	0	244.79	688.538	4872.09	213958	0	2837.81	525.114	505.997	2136.15	195.657	1000.07
15	206	2990	409	13785.88	685.195	0	17.938	663.191	4.066	365.99	744.473	8711.87	369647	0	2115.76	441.483	277.075	1383.77	454.921	1840.87
15	206	2990	409	13785.88	685.195	0	17.938	663.191	4.066	341.82	744.473	8711.87	369647	0	2068.07	387.026	496.242	1214.71	357.123	1899.91
15	206	2990	409	13785.88	685.195	0	17.938	663.191	4.066	355.62	744.473	8711.87	369647	0	1932.49	313.321	434.791	1120.74	376.961	1932.93
15	206	2990	409	13785.88	685.195	0	17.938	663.191	4.066	306.74	744.473	8711.87	369647	0	2160.24	286.969	516.452	1315.17	328.621	2236.38
15	206	2990	409	13785.88	685.195	0	17.938	663.191	4.066	225.7	744.473	8711.87	369647	0	2209.71	411.077	408.312	1435.83	365.571	2270.02
15	206	2990	409	13785.88	685.195	0	17.938	663.191	4.066	311.68	744.473	8711.87	369647	0	2189.31	480.114	604.306	1216.31	368.7	2211.77
15	206	2990	409	13785.88	685.195	0	17.938	663.191	4.066	300.38	744.473	8711.87	369647	0	2190.75	508.282	397.887	1340.36	452.499	1822.51
15	206	2990	409	13785.88	685.195	0	17.938	663.191	4.066	369.72	744.473	8711.87	369647	0	2117.62	485.593	572.789	1216.32	328.516	1831.78
15	206	2990	409	13785.88	685.195	0	17.938	663.191	4.066	21.1	744.473	8711.87	369647	0	2249.53	638.406	485.204	1345.14	419.185	1819.73
15	206	2990	409	13785.88	685.195	0	17.938	663.191	4.066	369.68	744.473	8711.87	369647	0	2055.67	429.068	472.646	1305.58	277.451	1831.02

Abbildung A.49: Ergebnisübersicht für die Simulationsstudien, Teil 4

Literaturverzeichnis

- [1] MEFFERT, M., BURMANN, C., KIRCHGEORG, M.: *Marketing: Grundlagen marktorientierter Unternehmensführung. Konzepte - Instrumente - Praxisbeispiele*. 10. Wiesbaden: Gabler Verlag, 2011
- [2] WINDT, K., HÜLSMANN, M.: Changing paradigms in logistics - understanding the shift from conventional control to autonomous cooperation and control. In: WINDT, K., HÜLSMANN, M. (Hrsg.): *Understanding Autonomous Cooperation & Control - The Impact of Autonomy on Management, Information, Communication, and Material Flow*. Berlin: Springer Verlag, 2007, Kapitel 1, S. 4–16
- [3] BÖSE, F., LAMPE, W.: Adoption of RFID in Logistics. In: *Proceedings of the 5th International Business Information Management Association Conference*. Cairo, 2005, S. 62–65
- [4] WINDT, K., BÖSE, F., PHILIPP, T.: Autonomy in Production Logistics - Identification, Characterisation and Application. In: *International Journal of Robotics and CIM* 24 (2008), Nr. 4, S. 572–578
- [5] BECKER, T., WINDT, K.: A Comparative View on Existing Autonomous Control Approaches: Observations from a Simulation Study. In: HÜLSMANN, M., SCHOLZ-REITER, B., WINDT, K. (Hrsg.): *Autonomous Cooperation and Control in Logistics*. Springer Berlin Heidelberg, 2011, S. 275–289
- [6] SCHOLZ-REITER, B., HÖHNS, H.: Selbststeuerung logistischer Prozesse mit Agentensystemen. In: SCHUH, G. (Hrsg.): *Produktionsplanung und -steuerung. Grundlagen, Gestaltung und Konzepte*. Berlin: Springer Verlag, 2006, S. 745–780

- [7] SCHOLZ-REITER, B., MEYER-BARLAG, C., HARJES, F.: Real-time vehicle tracking and tracing by means of radio technology. In: PAWAR, P.S., POTTER, A.T. (Hrsg.): *Proceedings of Papers of the 17th International Symposium on Logistics (ISL 2012) - New Horizons in Logistics and Supply Chain Management*. Nottingham: Centre for Concurrent Enterprise, Nottingham University Business School, 2012, S. 529–537
- [8] SCHOLZ-REITER, B., KOLDITZ, J., HILDEBRANDT, T.: Engineering autonomously controlled logistic systems. In: *International Journal of Production Research* 47 (2009), März, Nr. 6, S. 1449–1468
- [9] KOLDITZ, J., SCHOLZ-REITER, B. (Hrsg.): *Vorgehensmodell zur Erstellung von Fachkonzepten für selbststeuernde produktionslogistische Prozesse*. 10. Berlin: Gito Verlag, 2009. – 178 S.
- [10] GEHLICH, D., LUFT, A., LIBERT, S.: Ein dezentral gesteuertes Kommissionierlager. In: GÜNTNER, Willibald, HOMPEL, Michael (Hrsg.): *Internet der Dinge in der Intralogistik*. Springer Berlin Heidelberg, 2010 (VDI-Buch), S. 295–311
- [11] PILLE, C.: In Process Embedding of Piezo Sensors and RFID Transponders into Cast Parts for Autonomous Manufacturing Logistics. In: *Smart System Integration: 4th European Conference & Exhibition on Integration Issues of Miniaturized Systems*. Berlin, Offenbach: VDE Verlag GmbH, 2010
- [12] VEIGT, M., GANJI, F., MORALES KLUGE, E., SCHOLZ-REITER, B.: Autonomous Control in Production Planning and Control: How to Integrate Autonomous Control into Existing Production Planning and Control Structures. In: HÜLSMANN, M., SCHOLZ-REITER, B., WINDT, K. (Hrsg.): *Autonomous Cooperation and Control in Logistics*. Berlin: Springer, 2011, S. 313–329
- [13] GANJI, F., VEIGT, M., SCHOLZ-REITER, B.: Prototyping in research domains: A prototype for autonomous production logistics. In: UCKELMANN, D., SCHOLZ-REITER, B., RÜGGE, I., HONG, B., RIZZI, A. (Hrsg.): *The Impact of Virtual, Remote and Real Logistics Labs*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2012, S. 81–89

- [14] SOWADE, S., RIPPEL, D., SCHOLZ-REITER, B.: Modeling Concept for the Infrastructure of Autonomous Logistic Processes. In: *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 5 (2012), Nr. 4, S. 254-266
- [15] SCHOLZ-REITER, B., SOWADE, S., RIPPEL, D., TEUCKE, M., ÖZSAHIN, M., HILDEBRANDT, T.: A Contribution to the Application of Autonomous Control in Manufacturing. In: *International Journal of Computers* 3 (2009), Nr. 3, S. 279–291
- [16] PIOTROWSKI, J., RUTHENBECK, C., HARJES, F., SCHOLZ-REITER, B.: A Multi-Loop Development Process for a Wearable Computing System in Autonomous Logistics. In: CRUZ-CUNHA, M.M., MOREIRA, F. (Hrsg.): *Handbook of Research on Mobility and Computing: Evolving Technologies and Ubiquitous Impacts*, IGI-Global, 2011, S. 738–758
- [17] SCHOLZ-REITER, B., ÖZSAHIN, M.-E., SCHWEIZER (VIRNICH), A., ISENBERG, M.-A.: Combined Information and Communication Technologies for Location and Status Transparency on Ro-Ro Terminals. In: BRUZZONE, A., CUNHA, G., FRYDMAN, C., GIAMBIASI, N., MEKOUAR, K., MERKURIEV, Y., PIERA, M. A. (Hrsg.): *The 13th international Conference on Harbor maritime multimodal logistics modeling & simulation (HMS2010)*. Fez, Morocco: N.N, 2010, S. 127–132
- [18] HARJES, F., SCHOLZ-REITER, B.: Autonomous Control in Event Logistics. In: AFFENZELLER, M., BRUZONNE, A.G., DE FELICE, F., DEL RIO VILAS, D., FRYDMAN, C., MASSEI, M., MERKURYEV, Y. (Hrsg.): *Proceedings of the 11th International Conference on Modeling and Applied Simulation 2012*. Rende(CS), Italy: DIME, University of Genoa, 2012, S. 302–308
- [19] REKERSBRINK, H., MAKUSCHEWITZ, T., SCHOLZ-REITER, B.: A distributed routing concept for vehicle routing problems. In: *Logistics Research* 1 (2008), November, Nr. 1, S. 45–52
- [20] GEHRKE, J.D., OBER-BLÖBAUM, C.: Multiagent-based Logistics Simulation with PlaSMA. In: *GI Proceedings: Beiträge der 37. Jahrestagung der Gesellschaft für Informatik*. Bremen, 2007, S. 416–419

- [21] WARDEN, T., PORZEL, R., GEHRKE, J.D.: Towards ontology-based multiagent simulations: The plasma approach. In: BARGIELA, A., AZAM ALI, S., CROWLEY, D., KERCKHOFFS, E. (Hrsg.): *24th European Conference on Modeling and Simulation (ECMS 2010)*, European Council for Modeling and Simulation, 2010, 50–56
- [22] GUDEHUS, T.: *Dynamische Disposition - Strategien, Algorithmen und Werkzeuge zur optimalen Auftrags-, Bestands- und Fertigungsdisposition*. 3. Berlin: Springer Verlag, 2011
- [23] WEBER, J.: Überlegungen zu einer theoretischen Fundierung der Logistik in der Betriebswirtschaftslehre. In: NYHUIS, P. (Hrsg.): *Beiträge zu einer Theorie der Logistik*. Springer Berlin Heidelberg, 2008, S. 43–65
- [24] GUDEHUS, T.: Organisation, Disposition und Prozesssteuerung. In: *Logistik 1*. Springer Berlin Heidelberg, 2012 (VDI-Buch), S. 41–62
- [25] ARNOLD, D., ISERMANN, H., KUHN, A., TEMPELMEIER, H., FUHRMANS, K. (Hrsg.): *Handbuch Logistik*. 3. Berlin: Springer Verlag, 2008
- [26] GUDEHUS, T.: Auftragsdisposition und Produktionsplanung. In: *Logistik 1*. Springer Berlin Heidelberg, 2012 (VDI-Buch), S. 279–317
- [27] GUDEHUS, T.: Netzwerkmanagement und Disposition. In: *Dynamische Disposition - Strategien, Algorithmen und Werkzeuge zur optimalen Auftrags-, Bestands- und Fertigungsdisposition*. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 2012, S. 15–28
- [28] HELLINGRATH, B., KELLER, B., WITTHAUT, M.: Klassifizierung von Dispositionsstrategien großer Logistiknetze. In: *Technical Report 2002-01 des Teilprojekts M7 des Sonderforschungsbereiches 559*. Dortmund: Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik -IML-, Dortmund, Univ. Dortmund, Lehrstuhl für Fabrikorganisation, 2002
- [29] DITTRICH, J., MERTENS, P., HAU, M., HUGFARD, A.: Konfigurationshinweise zu Dispositionsparametern der Produktionsplanung in SAP ERP. In: *Dispositionsparameter in der Produktionsplanung mit SAP ERP*. 5. Vieweg+Teubner, 2009, S. 79–210

- [30] GUDEHUS, T., KOTZAB, H.: *Comprehensive Logistics*. 2. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 2012
- [31] RIECK, J.: Problemstellungen der Tourenplanung. In: *Tourenplanung mittelständischer Speditionsunternehmen*. Wiesbaden: Gabler Verlag, 2009 (Produktion und Logistik), S. 7–50
- [32] GÜNTHER, H.-O., TEMPELMEIER, H.: Transport- und Tourenplanung. In: *Produktion und Logistik*. 6. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 2005 (Springer-Lehrbuch), S. 266–279
- [33] WENGER, Wolf: Generelle Tourenplanungsprobleme. In: *Multikriterielle Tourenplanung*. Wiesbaden: Gabler Verlag, 2010, S. 39–92
- [34] APPLGATE, D., BIXBY, R., CHVATAL, V., COOK, W.: *The Travelling Salesman Problem: A Computational Study*. Princeton: Princeton University Press, 2006
- [35] DOMSCHKE, W.: *Logistik: Rundreisen und Touren*. München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 2010 (Logistik / Wolfgang Domschke)
- [36] KÄMPF, M.: Probleme der Tourenbildung. In: *Chemnitzer Informatik-Berichte, CSR-06-04*. Chemnitz: Fakultät für Informatik, TU Chemnitz, 2006
- [37] KRYPCZYK, V.: *Nachbarschaftssucheverfahren für dynamische Pickup- und Delivery-Probleme*. Hagen, FernUniversität - Gesamthochschule in Hagen, Diss., 2009
- [38] FISCHETTI, M., LODI, A., TOTH, P.: Exact Methods for the Asymmetric Traveling Salesman Problem. In: GUTIN, G., PUNNEN, A.P. (Hrsg.): *The Traveling Salesman Problem and Its Variations* Bd. 12. Springer US, 2004, S. 169–205
- [39] KORTE, B., VYGEN, J.: Das Traveling-Salesman-Problem. In: *Kombinatorische Optimierung*. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 2012 (Springer-Lehrbuch Masterclass), S. 589–627

- [40] NADDEF, D.: Polyhedral Theory and Branch-and-Cut Algorithms for the Symmetric TSP. In: GUTIN, G., PUNNEN, A.P. (Hrsg.): *The Traveling Salesman Problem and Its Variations* Bd. 12. Springer US, 2004, S. 29–116
- [41] M., Silvano, PISINGER, D., VIGO, D.: The Three-Dimensional Bin Packing Problem. In: *Operations Research* 48 (2000), Nr. 2, S. 256–267
- [42] PARRAGH, S., DÖRNER, K., HARTL, R.: A survey on pickup and delivery problems. Part II: Transportation between pickup and delivery locations. In: *Journal für Betriebswissenschaft* (2008), Nr. 58, S. 81–117
- [43] BEKTAS, T.: The multiple traveling salesman problem: an overview of formulations and solution procedures. In: *Omega* 34 (2006), Nr. 3, S. 209 – 219
- [44] ROPKE, S., PISINGER, D.: An Adaptive Large Neighborhood Search Heuristic for the Pickup and Delivery Problem with Time Windows. In: *Transportation Science* 40 (2006), Nr. 4, S. 455–472
- [45] BERBEGLIA, G., CORDEAU, J.-F., LAPORTE, G.: Dynamic pickup and delivery problems. In: *European Journal of Operational Research* 202 (2010), Nr. 1, S. 8 – 15
- [46] NANRY, W.P., BARNES, J.W.: Solving the pickup and delivery problem with time windows using reactive tabu search. In: *Transportation Research Part B: Methodological* 34 (2000), Nr. 2, S. 107 – 121
- [47] LI, H., LIM, A.: A metaheuristic for the pickup and delivery problem with time windows. In: *Proceedings of the 13th International Conference on Tools with Artificial Intelligence*, 2001, S. 160–167
- [48] SHIN, H. J., KIM, C.-O., KIM, S. S.: A Tabu Search Algorithm for Single Machine Scheduling with Release Times, Due Dates, and Sequence-Dependent Set-up Times. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 19 (2002), Nr. 11, S. 859–866

- [49] WEGENER, I.: Simulated Annealing Beats Metropolis in Combinatorial Optimization. In: CAIRES, L., ITALIANO, G.F., MONTEIRO, L., PALAMIDESSI, M. C. and YUNG, Y.C. (Hrsg.): *Automata, Languages and Programming* Bd. 3580. Berlin, Heidelberg: Springer verlag, 2005, S. 589–601
- [50] VICENTE, J. de, LANCHARES, J., HERMIDA, R.: Placement by thermodynamic simulated annealing. In: *Physics Letters A* 317 (2003), Nr. 56, S. 415 – 423
- [51] ROSSMANITH, P.: Simulated Annealing. In: VÖCKING, B., ALT, H., DIETZFELBINGER, M., REISCHUK, R., SCHEIDELER, C., VOLLMER, H., WAGNER, D. (Hrsg.): *Algorithms Unplugged*. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 2011, S. 393–400
- [52] BRANKE, J., MIDDENDORF, M., NOETH, G., DESSOUKY, M.: Waiting Strategies for Dynamic Vehicle Routing. In: *Transportation Science* 39 (2005), Nr. 3, S. 298 – 312
- [53] ZACHARIADIS, E.E., TARANTILIS, C.D., KIRANOUDIS, C.T.: Designing vehicle routes for a mix of different request types, under time windows and loading constraints. In: *European Journal of Operational Research* 229 (2013), Nr. 2, S. 303 – 317
- [54] TOTH, P., VIGO, D., TOTH, P., VIGO, D. (Hrsg.): *The Vehicle Routing Problem*. Philadelphia, USA: Society for Industrial and Applied Mathematics, 2001
- [55] OLIVEIRA, H.C. Brandão, D., VASCONCELOS, G.C.: A hybrid search method for the vehicle routing problem with time windows. In: *Annals of Operations Research* 180 (2010), Nr. 1, S. 125–144
- [56] LARSEN, A.: *The Dynamic Vehicle Routing Problem*. Lyngby, IMM, Diss., 2001
- [57] OKUBO, H., JIAHUA, W., ONARI, H.: Characteristics of distributed autonomous production control. In: *International Journal of Production Research* 38 (2000), Nr. 17, S. 4205–4215

- [58] REKERSBRINK, H., MAKUSCHEWITZ, T., SCHOLZ-REITER, B.: Autonomously Controlled Storage Management in Vehicle Logistics - Applications of RFID and Mobile Computing Systems. In: *International Journal of RF Rechnologies Research and Applications* 1 (2009), Nr. 1, S. 57–67
- [59] SCHOLZ-REITER, B., GÖRGES, M., PHILIPP, T.: Autonomously controlled production systems - Influence of autonomous control level on logistic performance. In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 58 (2009), Nr. 1, S. 395–398
- [60] JEON, S., KIM, K., KOPFER, H.: Routing automated guided vehicles in container terminals through the Q-learning technique. In: *Logistics Research* 3 (2011), Nr. 1, S. 19–27
- [61] LEWANDOWSKI, M., GATH, M., WERTHMANN, D., LAWOW, M.: Agent-based Control for Material Handling Systems in In-House Logistics - Towards Cyber-Physical Systems in In-House-Logistics Utilizing Real Size. In: *Proceedings of 2013 European Conference on Smart Objects, Systems and Technologies (SmartSysTech)*, 2013, S. 1–5
- [62] SCHOLZ-REITER, B., REKERSBRINK, H., GÖRGES, M.: Dynamic Flexible Flow Shop Problems - Scheduling Heuristics vs. Autonomous Control. In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 59 (2010), Nr. 1, S. 465–468
- [63] BÖSE, F., PIOTROWSKI, J., SCHOLZ-REITER, B.: Autonomously controlled Storage Management in Vehicle Logistics - Applications of RFID and Mobile Computing Systems. In: *International Journal of RF Technologies: Research and Applications* 1 (2009), Nr. 1, S. 57–76
- [64] GATH, M., EDELKAMP, S., HERZOG, O.: Agent-based dispatching in groupage traffic. In: *Computational Intelligence In Production And Logistics Systems (CIPLS), 2013 IEEE Workshop on*, 2013, S. 54–60
- [65] GATH, M., EDELKAMP, S., HERZOG, O.: Agent-based planning and control in groupage traffic. In: *Proceedings of the 10th International Conference and Expo on Emerging Technologies*, 2013, S. to appear

- [66] GREULICH, C., EDELKAMP, S., GATH, M., WARDEN, T., HUMANN, M., HERZOG, O., SITHARAM, T.G.: Enhanced Shortest Path Computation for Multiagent-based Intermodal Transport Planning in Dynamic Environments. In: FILIPE, J., FRED, A.L.N. (Hrsg.): *5th International Conference on Agents and Artificial Intelligence (ICAART)* Bd. 2. Barcelona, Spain: SciTePress, February 15–18 2013, S. 324 – 329
- [67] SCHOLZ-REITER, B., SOWADE, S., HILDEBRANDT, T., RIPPEL, D.: Modeling of orders in autonomously controlled logistic systems. In: *Production Engineering* 4 (2010), Juni, Nr. 4, S. 319–325
- [68] LASS, S., THEUER, H., GRONAU, N.: A New Approach for Simulation and Modeling of Autonomous Production Processes. In: *45th Hawaii International Conference on System Science (HICSS), 2012*. Maui, HI, USA: IEEE Computer Society, 2012, S. 1247–1256
- [69] GRONAU, N., THEUER, H.: Potenziale autonomer Technologien in Produktion und Logistik. In: SIEPERMANN, E. (Hrsg.): *Logistik - Gestern, heute, morgen - Festschrift für Richard Vahrenkamp zur Vollendung des 65. Lebensjahres*. Berlin: Gito Verlag, 2011, S. 269 – 286
- [70] OESTEREICH, B.: *Analyse und Design mit UML 2.3: Objektorientierte Softwareentwicklung*. 9. München: Oldenbourg, 2009
- [71] SCHOLZ-REITER, B., HÖHNS, H., KOLDITZ, J., HILDEBRANDT, T.: Autonomous Supply Net Coordination. In: *In Proceedings of the 38th CIRP Manufacturing Systems Seminar*. Florianopolis, Brazil: CD-ROM, 2005
- [72] WAGNER, F., SCHMUKI, R., WAGNER, T., WOLSTENHOLME, P.: *Modeling software with finite state machines: a practical approach*. CRC Press, 2006
- [73] LAUX, H., GILLENKIRCH, R.M., SCHENK-MATHES, H.Y.: *Entscheidungstheorie*. Springer, 2012 (Springer-Lehrbuch)
- [74] SCHOLZ-REITER, B., SOWADE, S., RIPPEL, D.: Modeling the Control System Infrastructure for Autonomous Logistics Processes. In: DUFFIE, Neil A. (Hrsg.): *44th CIRP Conference on Manufacturing Systems*. Madison-Wisconsin, USA: Omnipress, 2011, S. 1–6

- [75] SCHOLZ-REITER, B., HILDEBRANDT, T., KOLDITZ, J.: Modellierung selbststeuernder produktionslogistischer Prozesse ñ die Modellierungsmethode ALEM. In: MATTFELD, D.C., GÜNTHER, H.-O., SUHL, L., VOŠ, St. (Hrsg.): *Informations- und Kommunikationssysteme in SCM, Logistik und Transport. Teilkonferenz der Multikonferenz Wirtschaftsinformatik 2008*. Paderborn: Universität Paderborn, 2008, S. 173–185
- [76] TEUFEL, M., HELMING, J.: *Eclipse 4: Rich Clients mit dem Eclipse 4.2 SDK*. Frankfurt am Main: entwickler.press, Software and Support Media GmbH, 2012
- [77] STEINBERG, D., BUDINSKY, F., MERKS, Ed , PATERNOSTRO, M.: *EMF: eclipse modeling framework*. Pearson Education, 2008
- [78] SCHOLZ-REITER, B, HILDEBRANDT, T , KOLDITZ, J: ALEM-T: A Modelling Tool for Autonomous Logistic Processes. In: *40th CIRP Seminar on Manufacturing Systems, Liverpool, Department of Engineering, University of Liverpool*, 2009
- [79] GEHRKE, J. D., HERZOG, O., LANGER, H., MALAKA, R. R.and P. R.and Porzel , WARDEN, T.: An Agent-based Approach to Autonomous Logistic Processes. In: *KI - Künstliche Intelligenz* 24 (2010), Juni, Nr. 2, S. 137–141
- [80] SCHULDT, A., D., Gehrke. J., WERNER, S.: Designing a Simulation Middleware for FIPA Multiagent Systems. In: *2008 IEEE/WIC/ACM International Conference on Web Intelligence and Intelligent Agent Technology*, IEEE Computer Society Press, 2008, S. 109–113
- [81] BELLIFEMINE, F., POGGI, A., RIMASSA, G.: JADE–A FIPA-compliant agent framework. In: *Proceedings of PAAM* Bd. 99. London, 1999, S. 33
- [82] BELLIFEMINE, Fabio L., CAIRE, Giovanni , GREENWOOD, Dominic: *Developing multi-agent systems with JADE*. Bd. 7. Wiley. com, 2007
- [83] BECHHOFFER, S., VAN HARMELEN, F., HENDLER, J., HORROCKS, I., MCGUINNESS, D.L., PATEL-SCHNEIDER, P.F., STEIN, L.A. u. a.: OWL web ontology language reference. In: *W3C recommendation* 10 (2004), S. 2006–01

- [84] GEHRKE, J. D., WOJTUSIAK, J.: Traffic Prediction for Agent Route Planning. In: BUBAK, M., ALBADA, G.D. van, DONGARRA, J. (Hrsg.) , SLOOT, P.M.A. (Hrsg.): *8th International Conference on Computational Science 2008, vol. 3*. Berlin: Springer, 2008, S. 692–701
- [85] SCHULDT, A., WERNER, S.: Distributed Clustering of Autonomous Shipping Containers by Concept, Location, and Time. In: MÜLLER, J. P., PETTA, P., KLUSCH, M., GEORGEFF, M. (Hrsg.): *5th German Conference on Multiagent System Technologies (MATES 2007)*, Springer-Verlag, 2007, S. 121–132
- [86] SCHOLZ-REITER, B., REKERSBRINK, H., FREITAG, M.: Kooperierende Routingprotokolle zur Selbststeuerung von Transportnetzen. In: *Industrie Management* 22 (2006), Nr. 3, S. 7–10
- [87] REKERSBRINK, H.: *Methoden zum selbststeuernden Routing autonomer logistischer Objekte - Entwicklung und Evaluierung des Distributed Logistics Routing Protocol (DLRP)*. Bremen, Universität Bremen, Diss., 2012
- [88] SCHOLZ-REITER, B., REKERSBRINK, H., GÖRGES, M.: Dynamic Flexible Flow Shop Problems - Scheduling Heuristics vs. Autonomous Control. In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 59 (2010), Nr. 1, S. 465–468
- [89] REKERSBRINK, H., SCHOLZ-REITER, B., ZABEL, C.: An Autonomous Control Concept for Production Logistics. In: DANGELMAIER, W., AL et (Hrsg.): *Advanced Manufacturing and Sustainable Logistics*, Springer, 2010, S. 245–256
- [90] OPRESNIK, Marc O., RENNHAK, Carsten: Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre. In: *Grundlagen der Allgemeinen Betriebswirtschaftslehre*. Springer, 2012, S. 1–19
- [91] ALLEN, J., O'TOOLE, W., HARRIS, R., MCDONNELL, I.: *Festival and Special Event Management*. Wiley, 2010 (Wiley Australia tourism series)

- [92] HOLZBAUR, U.D., JETTINGER, E., KNAU, B., MOSER, R., ZELLER, M.: *Eventmanagement: Veranstaltungen professionell zum Erfolg führen*. Springer, 2010
- [93] HARJES, F., SCHOLZ-REITER, B.: Informationstransparenz in der Veranstaltungslogistik. In: *Industrie Management* 29 (2013), Nr. 5, S. 39–42
- [94] ALICKE, K.: Die Bedeutung der Struktur für Logistiknetzwerke. In: *Planung und Betrieb von Logistiknetzwerken - Unternehmensübergreifendes Supply Chain Management*. Springer Berlin Heidelberg, 2005 (VDI-Buch), S. 157–170
- [95] HARJES, F., SCHOLZ-REITER, B.: Selbststeuernde Logistik im Umlaufmanagement von Verleihartikeln. In: DANGELMAIER, W., LAROQUE, C., KLAAS, A. (Hrsg.): *Simulation in Produktion und Logistik. Entscheidungsunterstützung von der Planung bis zur Steuerung*. Paderborn: HNI Verlagsschriftenreihe 2013, 2013, S. 217–227
- [96] WERNERS, Brigitte: Projektplanung. In: *Grundlagen des Operations Research*. Springer Berlin Heidelberg, 2013 (Springer-Lehrbuch), S. 211–256
- [97] HARJES, F., SCHOLZ-REITER, B.: Agent-based Disposition in Event Logistics. In: *Research in Production and Logistics* 3 (2013), Nr. 2, S. 137–150
- [98] JURCZYK, A., KOPFER, H., KRAJEWSKA, M.: Speditionelle Auftragsdisposition eines mittelständischen Transportunternehmens. In: *Internationales Verkehrswesen* (2006), Nr. 6, S. 275–279
- [99] SCHOLZ-REITER, B., HARJES, F., RIPPEL, D.: Von der Selbststeuerung zu cyber-physischen Systemen. In: *Enterprise-Integration - Auf dem Weg zum kollaborativen Unternehmen* (2014), S. 1–6, in print
- [100] HARJES, F., SCHOLZ-REITER, B.: Integration Aspects of Autonomous Control in Event Logistics. In: *Research in Production and Logistics* 4 (2014), Nr. 1, S. 5–20

- [101] HARJES, F., SCHOLZ-REITER, B.: Selbststeuerndes Routing für Verleihartikel. In: *Industrie Management* 29 (2013), Nr. 6, S. 44–48
- [102] HARJES, F., SCHOLZ-REITER, B.: Application of Autonomous Control in Event Logistics - Concept, Implementation and First Results. In: *International Journal of Logistics Management* 25 (2014), Nr. 1, S. 1–19, submitted
- [103] PlaSMA Multiagent Simulation User Guide. Bremen: TZI-Center for Computing and Communication Technologies, 2013
- [104] SCHOLZ-REITER, B., RIPPEL, D., SOWADE, S.: A Concept for Simulation of Autonomous Logistic Processes. In: *International Journal of Systems Applications, Engineering and Development* 5 (2011), Nr. 3, S. 324–333
- [105] GRONAU, N., HAAK, L., NOLL, R.-P.: Integration von SCM-Lösungen in die betriebliche Informationssystemarchitektur. In: BUSCH, A., DANGELMAIER, W. (Hrsg.): *Integriertes Supply Chain Management. Theorie und Praxis effektiver unternehmensübergreifender Geschäftsprozesse*. Wiesbaden: Gabler Verlag, 2002, S. 385 – 401
- [106] LAND, R., CRNKOVIC, I.: Software systems integration and architectural analysis-a case study. In: *Proceedings of the International Conference on Software Maintenance, 2003. ICSM 2003*. IEEE, 2003, S. 338–347
- [107] GRONAU, N., KURBEL, K. (Hrsg.): *Enterprise-Resource-Planning und Supply-Chain-Management: Architektur und Funktionen*. München: Oldenbourg Verlag, 2004 (Lehrbücher Wirtschaftsinformatik)
- [108] SKULSCHUS, M., WIEDERSTEIN, M.: *XML: Standards und Technologien*. Comelio Medien, 2012
- [109] KLETTKE, M., MEYER, H.: *XML & Datenbanken. Konzepte, Sprachen und Systeme*. Heidelberg: Dpunkt-Verlag, 2002
- [110] FTP (file transfer protocol). In: *Encyclopedia of Genetics, Genomics, Proteomics and Informatics*. Springer Netherlands, 2008, S. 718

- [111] FUNKE, N.: *Konzept für den Einsatz und die Optimierung eines Logistiksystems mit RFID-Unterstützung in der Veranstaltungstechnik*. Hamburg, Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg - Fakultät Design, Medien und Information, Diplomarbeit, 2010
- [112] WEBER, J.: *Logistikkostenrechnung*. Berlin/Heidelberg: Springer Vieweg, 2012
- [113] WINDT, K., PHILIPP, T., BÖSE, F., BECKER, T.: Application of the 3-component evaluation system for autonomous control in logistics. In: *Proc. IMechE, Part B: J. Engineering Manufacture* (2010), Nr. 224, S. 1267–1276
- [114] WANG, F.S., CHEN, L.H.: Simulated Annealing. In: DUBITZKY, W., WOLKENHAUER, O., CHO, K.H., YOKOTA, H. (Hrsg.): *Encyclopedia of Systems Biology*. Springer New York, 2013. – ISBN 978–1–4419–9862–0, S. 1942–1942
- [115] SUMAN, B., KUMAR, P.: A survey of simulated annealing as a tool for single and multiobjective optimization. In: *Journal of the Operational Research Society* 57 (2006), S. 1143–1160
- [116] POLACEK, M., BENKNER, S., DOERNER, K.F., HARTL, R.F.: A Cooperative and Adaptive Variable Neighborhood Search for the Multi Depot Vehicle Routing Problem with Time Windows. In: *BuR - Business Research* 1 (2008), Nr. 2, S. 207–218. – ISSN 2198–3402
- [117] KOPFER, H., KOPFER, H.-W., STACHE, U.: Strategien für die Auftragsdisposition in Speditionsunternehmen. In: BORTFELDT, A., HOMBERGER, J., KOPFER, H., PANKRATZ, G., STRANGMEIER, R. (Hrsg.): *Intelligent Decision Support*. Gabler, 2008, S. 157–175
- [118] HARJES, F., SCHOLZ-REITER, B.: Autonomous control in closed dynamic logistic systems. In: *Proceedings of the 2nd International Conference on System-Integrated Intelligence (SysInt2014). Challenges for Product and Production Engineering*. Philadelphia, USA: Elsevier, 2014, S. 10
- [119] HARJES, F., SCHOLZ-REITER, B.: Savings Potential Through Autonomous Control in the Distribution of Rental Articles. In: *Proceedings of*

the 4th International Conference on Dynamics in Logistics (LDIC 2014).
Berlin/Heidelberg: Springer Verlag, 2014

- [120] ADAC *Autokostenübersicht 2013*. München, 2013. – Verfügbar online unter <http://www.adac.de/>, abgerufen am 23.11.2013
- [121] LEITL, C.: *Wirtschaftskammer Österreich: LKW - Kalkulation*. Wien, 2014. – Verfügbar online unter <http://www.dietransporteure.at/lkw-kalkulation/berechnung.php>, abgerufen am 20.01.2014
- [122] BÖGER, T.: *Gehalt.de*. Hamburg, 2014. – Verfügbar online unter <http://www.gehalt.de/einkommen/Kraftfahrer-Fernverkehr-Nahverkehr/775197>, abgerufen am 17.01.2014
- [123] JOHNSON-OHLA, R.: *VDI Nachrichten - Ingenieurkarriere.de*. Düsseldorf, 2012. – Verfügbar online unter <http://www.ingenieurkarriere.de/bewerberservice/beratung/gehaltscheck/gehaltscheck.asp>, abgerufen am 21.11.2013
- [124] BISPINCK, R., DRIBBUSCH, H., OEZ, F., JUNG, R.: *Lohnspiegel.de*. Düsseldorf, 2013. – Verfügbar online unter <http://www.lohnspiegel.de/main/zusatzinformationen/fachinformatikerinnen>, abgerufen am 21.11.2013