

# **Entwicklung einer integrativen Planungsmethodik für Autoterminals mittels selbststeuernder logistischer Prozesse**

Dem Fachbereich Produktionstechnik

der

UNIVERSITÄT BREMEN

zur Erlangung des Grades Doktor der Ingenieurwissenschaften

– Dr.-Ing. –

genehmigte

Dissertation

von

Dipl.-Wi.-Ing. Michael Görge

Gutachter

Prof. Dr.-Ing. Michael Freitag  
Universität Bremen

Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza  
Karlsruher Institut für Technologie

Tag der mündlichen Prüfung: 10.12.2024



---

## Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne unerlaubte Hilfe angefertigt habe. Des Weiteren habe ich keine anderen als die von mir angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt. Alle Stellen, die wörtlich oder inhaltlich aus veröffentlichten oder unveröffentlichten Schriften entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.

---

Michael Görges

---

Ort, Datum

---



---

## Zusammenfassung

Automobilterminals nehmen eine Schlüsselrolle in internationalen Fahrzeuglieferketten ein, indem sie als zentrale Knotenpunkte der gesamten Supply Chain fungieren. In ihrer Rolle als logistischer Entkopplungspunkt sehen sich diese Häfen sowohl lieferkettenübergreifenden externen als auch internen dynamischen Wechselwirkungen gegenüber. Klassische, zeitlich kaskadierte Terminalplanungsprozesse können auf diese volatilen und dynamischen Rahmenbedingungen nur unzureichend reagieren und bergen somit Effizienzsteigerungspotenziale. Um einen Beitrag zu leisten, dieses Potenzial zu erschließen, wird in dieser Arbeit eine neue Planungsmethodik auf Basis selbststeuernder logistischer Prozesse entwickelt und evaluiert.

Methodisch folgt diese Arbeit dem allgemeinen Systems-Engineering Vorgehensmodell, um eine neue Planungsmethodik zielgerichtet zu entwickeln. Im Rahmen der Vorstudienphase wird zunächst der Problembereich analysiert und die Eignung selbststeuernder logistischer Prozesse als mögliches Lösungsprinzip untersucht. Anschließend werden in Hauptstudienphase die gewonnenen theoretischen Erkenntnisse am Beispiel eines realen Automobilterminals angereichert und abgesichert. Auf dieser Grundlage wird eine geeignete Planungsmethodik entwickelt und eine konkrete Umsetzung auf Basis von pheromonbasierten Selbststeuerungsmethoden vorgeschlagen. Im Rahmen von Detailstudien untersucht diese Arbeit weiterhin die Leistungsfähigkeit der neuen Methodik durch Simulationsstudien an einem generischen Terminalmodell und einem Simulationsmodell des betrachteten realen Automobilterminals. Abschließend werden in der Phase des Systembaus die Anforderungen an eine Implementierung in der Praxis untersucht und ein Handlungsleitfaden für eine Umsetzung erarbeitet.

Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigten, dass die entwickelte Methode zur Überwindung der Schwachstellen des klassischen kaskadierten Planungsprozesses beitragen und die logistische Leistung von Terminals unter dynamischen und komplexen Rahmenbedingungen steigern kann. Die Analyse der Umsetzungsanforderungen und der entwickelte Handlungsleitfaden zeigen, dass eine Umsetzung der Lösung niedrigschwellig und aufwandsarm möglich ist. Somit ist eine hohe praxeologische Relevanz der in dieser Arbeit entwickelte Methodik gegeben. Die Ergebnisse können als Ausgangspunkt für weitere Forschungsarbeiten genutzt werden, um beispielsweise die Parametrisierung der Methoden weiter zu optimieren oder neue ergänzende Selbststeuerungsansätze für Automobilterminals zu entwickeln.

---

---

# Inhaltsverzeichnis

## Inhalt

Tabellenverzeichnis.....	IX
Abkürzungsverzeichnis.....	XI
1. Einleitung.....	1
1.1 Ausgangssituation und Motivation .....	1
1.2 Forschungsleitende Fragestellungen .....	3
1.3 Zielstellung der Arbeit.....	5
1.4 Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit.....	6
2. Theoretische Grundlagen der Arbeit .....	9
2.1 Systeme und Systembetrachtungen .....	11
2.2 Abbildung von Systemen und Modellbildung.....	18
2.3 Simulationsmodelle.....	22
2.4 Automobilterminals als logistisches System.....	34
2.5 Planung und Steuerung von Automobilterminals .....	45
2.6 Selbststeuernde logistische Prozesse.....	66
2.7 Subsumtion.....	73
3. Analyse eines exemplarischen Terminals .....	74
3.1 Struktureller Aufbau des Beispielterminals.....	74
3.2 Ist-Prozesse und Einflussgrößen .....	78
3.3 Datenerhebung und Analyse .....	87
3.4 Wirkzusammenhänge und Schwachstellenanalyse.....	93
4. Konzipierung und Modellierung einer integrativen Terminalplanung .....	96
4.1 Anforderungskatalog an eine integrative Planungsmethodik.....	96
4.2 Ableiten eines Zielsystems .....	98
4.3 Modellierung eines generischen Terminalsystems.....	100
5. Entwicklung einer Planungsmethodik auf der Basis selbststeuernder Prozesse ...	107
5.1 Ableiten einer neuen Planungsmethodik.....	107
5.2 Auswahl geeigneter Selbststeuerungsverfahren .....	110
5.3 Pheromonbasierte Selbststeuerungsmethode für die Lagerzuordnung.....	115
5.4 Pheromonbasierte Selbststeuerungsmethode für die Verkehrsmittel .....	119
5.5 Hypothesen für die Evaluation .....	120
6. Evaluation der Planungsmethodik auf Basis selbststeuernder Prozesse .....	122
6.1 Analyse eines generischen Terminalmodells .....	122
6.2 Analyse des realdatenbasierten Terminalmodells.....	163
6.3 Zusammenfassung der Evaluation.....	181

---

7.	Entwicklung von Handlungsempfehlungen zur Umsetzung.....	183
7.1	Voraussetzungen für den Einsatz der Methodik in Automobilterminals .....	183
7.2	Leitfaden für die Umsetzung .....	191
7.3	Potenziale und Herausforderungen der Methodik im Praxiseinsatz .....	194
8.	Schlussbetrachtungen .....	198
8.1	Zusammenfassung .....	198
8.2	Implikationen für die Nutzung in der Praxis.....	200
8.3	Ausblick .....	200
9.	Literaturverzeichnis.....	202
Anhang 1.	Prozessmodell Bahnbeladung.....	214
Anhang 2.	Prozessmodell Bahnentladung.....	215
Anhang 3.	Prozessmodell Lkw-Beladung .....	216
Anhang 4.	Prozessmodell Lkw-Entladung .....	217
Anhang 5.	Prozessmodell Technikbewegungen .....	218
Anhang 6.	Statische Fahrzeugdaten .....	219
Anhang 7.	Bewegungsdaten .....	220
Anhang 8.	Schiffdaten .....	221





---

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Vorgehen und Aufbau der Arbeit.....	8
Abbildung 2: Mikrologik der Vorstudienphase.....	10
Abbildung 3: System und Systemelemente .....	13
Abbildung 4: Komplexität von Systemen.....	15
Abbildung 5: Klassifikation von Modellen nach Abbildungsmedium .....	19
Abbildung 6: Klassifikation nach Zustandsübergang und Zeitverhalten .....	21
Abbildung 7: Warteschlangenmodell .....	24
Abbildung 8: Einsatzfelder der ereignisdiskreten Simulation.....	26
Abbildung 9: Struktur hybrider Systeme.....	29
Abbildung 10: Zyklisches Vorgehen für die Simulationsmodellerstellung .....	30
Abbildung 11: Experimentplanung und -auswertung.....	32
Abbildung 12: Unternehmenslogistik nach Phasen des Güterflusses .....	36
Abbildung 13: Zielsystem der Produktionslogistik .....	39
Abbildung 14: Schiffstypen .....	41
Abbildung 15: Schifflinienverkehre.....	44
Abbildung 16: Automobilterminals als Entkopplungspunkt in der Supply Chain .....	47
Abbildung 17: Zusammenfassung der Terminalprozesse und ihre Schnittstellen.....	48
Abbildung 18: Einflussfaktoren auf die Terminalleistung.....	49
Abbildung 19: Temporale Entscheidungsebenen.....	50
Abbildung 20: Planungsaufgaben für Automobilterminals.....	51
Abbildung 21: Forecasting Framework .....	54
Abbildung 22: Zuordnung von Aufgaben .....	58
Abbildung 23: Liegeplatzlayouts .....	59
Abbildung 24: Grundproblem der Liegeplatzplanung .....	60
Abbildung 25: Zusammenarbeit von Planern an einem Multitouchtisch .....	63
Abbildung 26: Taxonomie Planungsverfahren unter Berücksichtigung von Unsicherheit .....	68
Abbildung 27: Charakteristika von intelligenten logistischen Objekten.....	70
Abbildung 28: Anforderungen an Selbststeuerungsstrategien .....	71
Abbildung 29: Vorgehensmodell zur Entwicklung von Selbststeuerungsstrategien.....	73
Abbildung 30: Luftbild Autoterminal Bremerhaven .....	75
Abbildung 31: Ablauf der Schiffsbeladung .....	79
Abbildung 32: Ablauf der Schiffsentladung .....	81
Abbildung 33: Ablauf der Flächenmasterplanung .....	86
Abbildung 34: Zeitliche Differenz von Eingangs- und Ausgangszeit zur Buchungszeit .....	90
Abbildung 35: Bestandsverläufe für exemplarische HMD-Kombinationen (Top 5) .....	91
Abbildung 36: Standtageverläufe für exemplarische HMD-Kombinationen (Top 5).....	92
Abbildung 37: Ursache-Wirkungsdiagramm Fahrstrecken .....	95
Abbildung 38: Rückkopplung im Zuordnungsprozess .....	100
Abbildung 39: Generisches Modell eines Automobilterminals.....	104
Abbildung 40: Planungsmethodik auf Basis selbststeuernder Prozesse .....	108
Abbildung 41: Entwicklungsvorgehensmodell für Selbststeuerung in Autoterminals .....	110
Abbildung 42: Potenzielle Eignung von Selbststeuerungsverfahren .....	112
Abbildung 43: Ablauf Berechnung Term Lagerdauer .....	117
Abbildung 44: Evaluationshypothesen.....	121
Abbildung 45: Hauptschleife des Flächenzuordnungsalgorithmus .....	125
Abbildung 46: Basisheuristik Liegeplatzzuweisung .....	128
Abbildung 47: Liegeplatzalgorithmus .....	129
Abbildung 48: Beispielhafte Fahrzeugankunftsfunktion in Szenario 1 .....	133
Abbildung 49: Bestand über Zeit – Ladevolumen: 600 Fzg. (oben); 2000 Fzg. (unten).....	134
Abbildung 50: Flächenzuordnung .....	135

---

Abbildung 51: Simulationsergebnisse bei linearem Abgangsverhalten .....	136
Abbildung 52: Sortiergrade bei steigender Amplitude .....	138
Abbildung 53: Simulationsergebnisse bei Schiffsabgängen .....	139
Abbildung 54: Sortiergrade bei Schiffsabgängen .....	140
Abbildung 55: XY-Diagramme – Fahrstecken über Bestand .....	141
Abbildung 56: Simulationsergebnisse bei zunehmender struktureller Komplexität.....	144
Abbildung 57: Simulationsergebnisse für variierende Evaporationskonstanten .....	146
Abbildung 58: Simulationsergebnisse in dem 6x6-Szenario .....	151
Abbildung 59: Fahrwege bei veränderten Evaporationskonstanten .....	153
Abbildung 60: Sortiergrade bei veränderten Evaporationskonstanten.....	154
Abbildung 61: Einflüsse der Faktoren auf die Fahrstrecke im generischen Modell.....	157
Abbildung 62: Einflüsse der Faktoren auf den Sortiergrad im generischen Modell.....	158
Abbildung 63: Zweidimensionale Wechselwirkungen (Fahrstrecke) - generisches Modell ..	159
Abbildung 64: Zweidimensionale Wechselwirkungen (Sortiergrad) - generisches Modell ...	160
Abbildung 65: Faktorkombinationen und Fahrstrecken .....	161
Abbildung 66: Faktorkombinationen und Sortiergrad .....	162
Abbildung 67: Ereignisdiskretes Simulationsmodell des realen Terminals .....	164
Abbildung 68: Input-Output-Validierung Terminalmodell.....	166
Abbildung 69: Simulationsergebnisse für das realdatenbasierte Terminalszenario.....	169
Abbildung 70: Normierte Fahrstrecken bei veränderten Evaporationskonstanten.....	171
Abbildung 71: Normierter Sortiergrad bei veränderten Evaporationskonstanten.....	172
Abbildung 72: Einfluss der Faktoren auf die normierte Fahrstrecke .....	173
Abbildung 73: Einfluss der Faktoren auf den normierten Sortiergrad .....	175
Abbildung 74: Zweidimensionale Faktorwechselwirkungen (Fahrstrecke) - Realmodell.....	177
Abbildung 75: Zweidimensionale Faktorwechselwirkungen (Sortiergrad) - Realmodell.....	178
Abbildung 76: Faktorkombinationen und normierte Fahrstrecken .....	179
Abbildung 77: Faktorkombinationen und normierter Sortiergrad .....	180
Abbildung 78: Planungsmethodik auf Basis pheromonbasierter Selbststeuerung.....	184
Abbildung 79: Möglicher logischer Infrastrukturaufbau für die Flächenzuordnung .....	187







---

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Simulationsgegenstände in der Logistik .....	26
Tabelle 2: Validierung von Simulationsmodellen.....	31
Tabelle 3: Klassifikation von Selbststeuerungsmethoden .....	72
Tabelle 4: Relevante Planungen für die betrachteten Prozesse.....	87
Tabelle 5: Zusammenfassung der Basisdaten .....	88
Tabelle 6: Untersuchungen an dem generischen Modell .....	131
Tabelle 7: HMD-Mix der OEM in Szenario 1 .....	132
Tabelle 8: Durchschnittliche Lagerdauer.....	132
Tabelle 9: Parameter des Flächen-Algorithmus (AF) .....	135
Tabelle 10: Mittlere Ankunfts volumen und Lagerdauer für einen OEM .....	143
Tabelle 11: Einlastungsparameter und Lagerdauer .....	148
Tabelle 12: Schiffsgruppen und Parameter.....	148
Tabelle 13: Parameter der Liegeplatzzuordnung .....	149
Tabelle 14: Vollfaktorieller Versuchsplan .....	156
Tabelle 15: Vergleich generisches Modell mit Terminalmodell.....	165

---

---

## Abkürzungsverzeichnis

<b>Abkürzung</b>	<b>Bedeutung</b>
AF	algorithmische Flächenzuordnung
Ampl.	Amplitude
AV	algorithmische Verkehrsmittelzuordnung
BAP	berth allocation problem - Liegeplatzzuordnung
BMS	bionic manufacturing system
BPMN	Business Process Model and Notation
DBAP	dynamic berth allocation problem – dynamische Liegeplatzzuordnung
DFÜ	Datenfernübertragung
DLRP	distributed logistics routing protocol
DP	decoupling point - Entkopplungspunkt
EDI	electronic data interchange
EDS	ereignisdiskrete Simulation
ESP	Endstellplatz
ETA	estimated time of arrival
ETD	estimated time of departure
EVU	Eisenbahnverkehrsunternehmen
FBS	Fahrer Bus/Shuttle
FCFS	first come first served
FIFO	first in first out
FP	Fahrpersonal
FPOR	first point of rest
FS	Fahrstrecken
Fzg.	Fahrzeuge
GA	genetischer Algorithmus
H-	Dekompositionsheuristik
H+	Reparaturheuristik
HMD-Mix	Hersteller-Modell-Destination-Mix
HMS	holonic manufacturing system

---

KF	Konventionelle Flächenzuordnung
KPI	key performance indicator
KV	konventionelle Verkehrsmittelzuordnung
LIFO	last in first out
Lkw	Lastkraftwagen
LPOR	last point of rest
MDE	mobiles Datenerfassungsgerät
NP	nichtdeterministisch polynomielle Zeit
OFAT	one factor at a time
OPP	order penetration point
PDI	pre Delivery Inspection
PF	pheromonbasierte Flächenzuordnung
Pkw	Personenkraftwagen
POS	point of sale
PPS	Produktionsplanung und -steuerung
PV	pheromonbasierte Verkehrsmittelzuordnung
RoRo	Roll-on Roll-off
RS	Reachstacker - Großgerät zur Handhabung von Containern
SA	simulated annealing
SCM	Supply-Chain-Management
SD	system dynamics
SG	Sortiergrad
VIN	vehicle identification number
VRP	vehicle routing problem
WMS	Warehouse-Management-System
WWS	Waren-Wirtschafts-System
ZF	zufällige Flächenzuordnung
ZV	zufällige Verkehrsmittelzuordnung
$\alpha$ PF	Evaporationskonstante Flächenzuordnung
$\alpha$ PV	Evaporationskonstante Verkehrsmittelzuordnung







---

# 1. Einleitung

Dieses Kapitel zeigt die Motivation und die hiermit verbundene Problemstellung dieser Arbeit auf. Ausgehend von der Ausgangssituation werden die grundlegenden forschungsleitenden Fragen und Arbeitshypothesen formuliert. Auf dieser Basis wird die Zielstellung dieser Arbeit definiert. Abgeschlossen wird dieses Kapitel durch die Erläuterung des Vorgehens und die Beschreibung der Struktur dieser Arbeit.

## 1.1 Ausgangssituation und Motivation

In den vergangenen Jahren konnte eine zunehmende weltweite Vernetzung innerhalb der Automobilindustrie beobachtet werden, die bis heute anhält. Von dieser Tendenz ist neben dem größtenteils containerbasierten Gütertausch von Vorprodukten entlang der automobilen Wertschöpfungsketten maßgeblich auch die globale Distribution von Fertigfahrzeugen betroffen. Für den Transport von Fertigfahrzeugen aus den Produktionswerken zu den jeweiligen Zielmärkten haben daher Seehäfen und insbesondere Automobilterminals eine zentrale Schlüsselrolle in dieser globalen Logistikkette eingenommen (Dias et al., 2010). Sie sind wichtige Knotenpunkte und vernetzen die Hersteller, Reeder, Fahrzeugspediteure und letztlich auch die Endkunden miteinander. Von einem nationalen Standpunkt gesehen, haben die hiesigen Seehäfen, mit einer Exportquote von über 76,7 Prozent und einem Exportwert von 273,98 Mrd. Euro (Stand 2021), eine herausragende Bedeutung für die deutsche Automobilindustrie inne (BMW, 2023). Die Kernaktivität von Autoterminals liegt in dem Umschlag von Fertigfahrzeugen aus ankommenden und abgehenden Verkehrsmitteln (Seeschiff, Bahn und Lkw), in der Bereitstellung von geeigneten Lagerplätzen und in der Koordination von umschlagsrelevanten Ressourcen (u.a. Liegeplätze, Bahnrampen, Lagerplätze, Personal, etc.) sowie in der effizienten Durchführung der mit diesen Aufgaben verbundenen physischen Fahrzeugbewegungen auf dem Terminalgelände (Dias et al., 2010). Neben der Funktion als reiner Umschlagsknoten in einem Logistiknetzwerk übernehmen Automobilterminals häufig verschiedene weitere wertschöpfende Aufgaben, wie beispielsweise die Durchführung von technischen Dienstleistungen (z. B. Reparatur- und Lackierarbeiten, Einbauten von Sonderausstattungen oder Transportschutz) (Böse et al., 2009; Böse, 2012). Aus dem Zusammenspiel dieser Prozesse resultiert ein komplexes Prozessgeflecht mit vielfältigen Planungs- und Steuerungsaufgaben, welches zahlreiche wechselseitige Interdependenzen zwischen den zugrundeliegenden Planungs- und Steuerungsparametern aufweist und einer starken systeminhärenten Komplexität und Dynamik unterliegt (Scholz-Reiter und Meinecke, 2011). Gegenwärtig werden diese einzelnen teilproblemspezifischen Planungsaufgaben (z.B. Kapazitäts- und Flächenplanung) auf unterschiedlichen Zeitskalen (operativ, taktisch und strategisch) gelöst und anschließend zu

---

einem Gesamtplanungsstand verdichtet (Mattfeld, 2006; Cordeau et al., 2011). Aus theoretischer Perspektive kann die Untergliederung der Gesamtplanungsaufgabe in einzelne separat lösbare Fragestellungen als Vereinfachung (im Sinne einer klassischen Aufgabendekomposition (Pinedo, 2016)) des Gesamtplanungsproblems gesehen werden, welche die rechnerische Komplexität handhabbar macht. Allerdings führen die Schnittstellen zwischen den einzelnen Planungsproblemen (durch die Verkettung von Teillösungen als Eingangsgröße für Folgeplanungen) zu einer Steigerung der organisationalen Komplexität. Veränderungen einzelner Teilpläne können durch diese Verkettung zu Ineffizienzen des Gesamtprozesses führen. Folglich sind die erstellten Pläne für die jeweiligen Planungsaufgaben eher starr und auf einen definierten Planungshorizont bezogen. Aufgrund dessen können stark volatile Rahmenbedingungen, die in Automobillogistikketten üblicherweise vorzufinden sind, während der Planerstellung und -durchführung nur bedingt berücksichtigt werden. Sie führen somit häufig zu Produktivitätsverlusten. Hieraus kann ein Bedarf nach der Integration und der Flexibilisierung einzelner Planungsleistungen abgeleitet werden, welcher jedoch, bedingt durch die rechnerischere Komplexität, aktuell nicht bedient werden kann. Im Bereich der Produktionslogistik wurde das Spannungsfeld zwischen durchführbaren Planungslösungen in komplexen Problemumgebungen einerseits und der fehlenden Anpassungsfähigkeit von bestehenden Plänen andererseits bereits adressiert (Freitag et al., 2004). Klassische prädikativ-reaktive Ansätze basieren auf a priori generierten Plänen und greifen während der Plandurchführung korrektiv (partielle oder komplette Neuplanung) in die Prozesse ein (Vieira et al., 2003; Ouelhadj und Petrovic, 2009). Folglich können diese Ansätze Pläne gut an sich verändernde Rahmenbedingungen anpassen, jedoch führen sie häufig zu unerwünschten Abweichungen gegenüber dem ursprünglich Geplanten (Plannervosität) (Ouelhadj und Petrovic, 2009). Dies kann insbesondere in kaskadierten Planungsabfolgen, in denen Folgeplanungen die vorherigen Teilpläne als Eingangsgröße verwenden, die Gesamtleistung negativ beeinflussen. Dem gegenüber zielen proaktive Ansätze (robuste Planung) nicht auf eine kontinuierliche Anpassung des bestehenden Plans, sondern auf die Erzeugung eines robusten Plans, welcher auch unter volatilen und dynamischen Rahmenbedingungen Bestand hat (Ouelhadj und Petrovic, 2009; Chaari et al., 2014). Methoden der robusten Planung nutzen oftmals die Implementierung von Redundanzen (zeitlich oder ressourcenbasiert), um änderungstolerante Pläne zu erstellen (Chaari et al., 2014). Im Gegensatz zu diesen klassischen prädikativ-reaktiven und proaktiven Verfahren verfolgt das Prinzip der Selbststeuerung logistischer Objekte ein grundlegend anderes Paradigma. Durch eine Verlagerung von Steuerungsentscheidungen von einer zentralen Instanz zu den logistischen Objekten, soll in Systemen ein positiv emergentes Verhalten erzeugt werden, welches die auftretenden Dynamiken beherrschen kann und logistische Zielerreichung steigert (Freitag et al., 2004; Scholz-Reiter et al., 2008a). Eine

---

problemorientierte Gestaltung von Selbststeuerungsstrategien kann in diesem Zusammenhang zudem eine Integration von verschiedenen planerischen Ebenen ermöglichen (Schukraft et al., 2016; Grundstein, 2017). Aufgrund der beschriebenen systeminhärenten Komplexität der Prozesse auf Automobilterminals einerseits und dem aufgezeigten Bedarf nach der Integration einzelner Planungsaufgaben andererseits, scheint der Einsatz von selbststeuernden Prozessen für Terminalprozesse besonders vielversprechend zu sein. Im Kontext von Automobilterminals konnte bereits auf der Ebene von Geschäftsprozessen das Potenzial von selbststeuernden Prozessen aufgezeigt werden (Böse et al., 2009; Böse, 2012). Hinsichtlich der Gestaltung und der Auswahl von selbststeuernden Prozessen zur integrativen Lösung der bestehenden Planungsprobleme für Automobilterminals besteht jedoch weiterhin Forschungsbedarf: zum einen existiert aktuell keine einheitliche Beschreibung der Terminalplanungsprobleme und deren wechselseitigen Abhängigkeiten, welche durch integrative Steuerungsentscheidungen intelligenter logistischer Objekte eine durchgängige Lösung erlaubt. Zum anderen fehlt ein grundsätzliches Erklärungsmodell für den Zusammenhang zwischen der Systemdynamik, der Gestaltung der Selbststeuerungsmethoden und der logistischen Leistung im Kontext der Prozesse eines Automobilterminals. Das Thema autonomer Steuerungsentscheidungen zur integrativen Planung ist folglich sowohl aus der Perspektive der Praxis als auch aus wissenschaftlicher Perspektive relevant. Aus praxisorientierter Sicht werden Lösungsansätze benötigt, welche die Potenziale einer integrativen Planung nutzbar machen, die Auswirkungen der systemischen Dynamik bewältigen, die Effizienz der Prozesse verbessern und die Wettbewerbsfähigkeit von Automobilterminals steigern können. Aus wissenschaftlicher Perspektive stellt sowohl die integrierte Beschreibung der bisher separat adressierten Planungsprobleme als auch die Gestaltung einer geeigneten Steuerungsmethode eine neue Forschungsfrage dar.

## **1.2 Forschungsleitende Fragestellungen**

In dem eingangs umrissenen sukzessiven kaskadierten Planungsablauf für Automobilterminals wird zunächst auf einem langfristigen Planungshorizont eine Volumenplanung für die einzelnen Verkehrsträger auf der Basis von vorhersagebasierten Daten (Forecasts oder Vertriebsplanungen) vorgenommen. Hierbei werden für die vorhandenen Be- und Entladeanlagen (Kajen, Bahnrampen, Lkw-Gates) kapazitätsbasiert Volumenströme für die jeweiligen Planungshorizonte abgeleitet. Auf dieser vorhersagebasierten Grobplanung wird in der Flächenmasterplanung eine Zuordnung von Fahrzeugvolumen zu Stellplatzflächen vorgenommen, mit dem Ziel möglichst kurze Fahrwege zwischen Bewegungsquelle und -senke zu ermöglichen. Diese Flächenmasterplanung kann als Ausgangspunkt für alle weiteren flächen- und verkehrsträgerbezogenen Planungen angesehen werden (u.a. Liegeplatzvorplanung, Festlegung von Bahnrampen zu Zügen). Auf

---

operativer Ebene werden diese Planungen zu einem späteren Zeitpunkt konkretisiert und beispielsweise durch die abschließende Liegeplatzplanung ergänzt. Durch die zentrale Rolle der Flächenmasterplanung als verbindendes Element im kaskadierten Planungsverlauf werden für diese Arbeit zwei Arbeitshypothesen formuliert:

- 1) Zeitliche Inflexibilität der kaskadierten Planung: Aufgrund der strategischen Ausrichtung und ihrer Funktion als fokaler Ausgangspunkt für alle Folgeplanungen ist die Flächenmasterplanung maßgeblich dominierend. Da die weiteren Planungen auf dem Flächenmasterplan aufbauen, ist eine kontinuierliche Adaption (bzw. Neuplanung) des Flächenmasterplans an sich verändernde Ausgangssituationen nur unzureichend möglich. Dynamische Veränderungen müssen auf anderen Planungsebenen abgefangen werden (kurzfristige Adaption). Hierdurch entsteht eine zeitliche Inflexibilität der Flächenmasterplanung, welche unter der Wirkung von externen dynamischen Einflussgrößen (z.B. Verschiebung von Fahrzeugvolumina oder Veränderungen im Destinationssplit) zu Effizienzverlusten führt.
  
- 2) Starker Einfluss von interner und externer Komplexität und Dynamik auf die Planungsergebnisse: Die vorherrschende Dynamik und die Komplexität des Terminalsystems limitieren die logistische Leistungsfähigkeit von Automobilterminals. Eine hohe strukturelle Komplexität erschwert die Lösung der Teilprobleme im kaskadierten Planungsprozess und erhöht die erforderliche Lösungskomplexität der jeweiligen Teilprobleme, während eine hohe dynamische Komplexität die Lösungsgüte von Teilplanungen und der Gesamtplanung verringert. So kann sich beispielsweise eine verspätete Schiffsankunft empfindlich auf die Kapazitätsplanung auswirken, indem einerseits freigehaltene Flächen für Importfahrzeuge nicht genutzt werden, bzw. andererseits mit Exportfahrzeugen belegte Flächen nicht wie geplant frei werden. Um die Wirkung von solchen Ereignissen möglichst gering zu halten, werden üblicherweise Planungsschritte (z.B. die Liegeplatzplanung) neu ausgeführt. Bei häufigen Anpassungen der bestehenden Pläne entsteht, wie auch bei den reaktiven Ansätzen in der Produktionslogistik, eine Plannervosität, welche die bereits beschriebenen negativen Folgen für die weitere Planungskaskade hat.

Da die beiden beschriebenen Effekte dem skizzierten Planungssystem inhärent sind, können sie nur durch eine Veränderung des gesamten Planungssystems selbst adressiert werden. In diesem Zusammenhang ergeben sich für diese Arbeit vier forschungsleitende Fragestellungen:

- 1) Können existierende Planungsansätze oder auch Teile dieser Ansätze dazu beitragen, diese systeminhärenten Schwachstellen zu lösen?

- 
- 2) Kann ein geeigneter Selbststeuerungsansatz formuliert bzw. entwickelt werden, um die sukzessiven Planungsschritte zu integrieren und aufeinander abzustimmen?
  - 3) Kann die logistische Leistungsfähigkeit von Automobilterminals durch den Einsatz dieser Selbststeuerungsmethode gesteigert werden?
  - 4) Welche Voraussetzungen müssen geschaffen werden, um eine solche Methode sinnvoll in realen Systemen einzusetzen?

Aus diesen forschungsleitenden Fragestellungen können die Teilziele dieser Arbeit abgeleitet werden. Im Folgenden werden sowohl das übergeordnete Ziel dieser Arbeit als auch die hiermit verbundenen Teilziele definiert und dargelegt.

### **1.3 Zielstellung der Arbeit**

Das übergeordnete Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung und Bewertung einer Planungsmethodik auf der Basis selbststeuernder logistischer Prozesse, welche eine integrierte Entscheidungsfindung für die beschriebenen Terminalplanungsprobleme ermöglicht und zu einer Flexibilisierung der Gesamtplanungsaufgabe führt. Dieses Gesamtziel wird in vier Teilziele untergliedert, welche mit den oben genannten forschungsleitenden Fragen korrespondieren. Im Rahmen des ersten Teilziels dieser Arbeit, dem deskriptiven Ziel, sollen neben der definitorischen Abgrenzung von relevanten Begriffen eine Präzisierung der Problemstellung und eine Einordnung in den aktuellen Stand der Forschung erfolgen. Die Erreichung des deskriptiven Ziels stellt den Ausgangspunkt für alle weiteren Aktivitäten dar. Kern dieser beschreibenden Darstellung ist zunächst die Definition von selbststeuernden logistischen Prozessen sowie den eng mit diesem Konzept verbundenen Begriffen der Komplexität und Dynamik. Parallel hierzu sollen die bestehenden Konzepte für die Planung und Organisation von Prozessen auf Autoterminals diskutiert werden. Insbesondere werden die bereits existierenden kaskadiert lösbaren Planungsprobleme (u.a. Liegeplatzplanung, Flächenmasterplanung und Flächenzuweisungsplanung) fokussiert. Ergänzt wird diese Betrachtung durch die Ist-Aufnahme der Prozesse an einem real existierenden Autoterminal (Bremerhaven). Anhand des exemplarischen Anwendungsfalls sollen die Bedarfe und Anforderungen an eine integrative Steuerungsmethode zusätzlich abgesichert und die Praxisrelevanz belegt werden.

Auf dieser Grundlage soll das zweite Ziel der Arbeit - das praktische Ziel - erreicht werden. Basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen soll methodisch abgeleitet werden, wie die Terminalplanungsprobleme möglichst integrativ durch eine geeignete Selbststeuerung adressiert werden können. Durch die Analyse der Einzelprobleme sollen Eigenschaften und

---

Anforderungen an eine integrierte Lösungsmethodik erarbeitet und in eine geeignete Selbststeuerung, welche die identifizierten Anforderungen erfüllt, überführt werden.

Das evaluative Ziel ist das dritte Teilziel dieser Arbeit. Für das Erreichen dieses Ziels soll die Wirksamkeit der entwickelten Methodik nachgewiesen werden. Für die Durchführung der geplanten Evaluation sollen umfangreiche Materialflusssimulationen genutzt werden. Die entwickelte Methode soll systematisch untersucht und mit bestehenden Verfahren verglichen werden. Neben der Untersuchung der Logistikleistung steht ebenfalls die Analyse der Wirkung von Dynamik und Komplexität im Fokus. In diesem Zusammenhang ist zu untersuchen, inwiefern die neue Steuerungsmethode gegenüber verschiedenen Dynamiken robust ist. Durch diese Betrachtung sollen die Potenziale, aber auch die Grenzen der neuen Methodik ausgelotet werden.

Im Rahmen des vierten Ziels (exploratives Ziel), sollen die gewonnenen Erkenntnisse verdichtet und in praxisrelevante Handlungsempfehlungen überführt werden. Konkret soll der praxisorientierte Bedarf nach integrativen Lösungen durch Handlungsempfehlungen für eine mögliche Implementierung bedient und eine Übertragbarkeit auf weitere Autoterminals sichergestellt werden.

#### **1.4 Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit**

Der Aufbau dieser Arbeit orientiert sich strukturell an der unter 1.3 beschriebenen Zielstellung und fokussiert auf die Beantwortung der zugrundeliegenden forschungsleitenden Fragestellungen. Aufgrund des breiten Aufgabenspektrums im Bereich der Terminalplanung und der Komplexität der jeweiligen Planungsprobleme ist eine strukturierte Vorgehensweise von integraler Bedeutung, um die Ziele dieser Arbeit erfolgreich zu erreichen. Im Bereich der Ingenieurwissenschaften haben sich Vorgehensmodelle etabliert, welche eine strukturierte und zielgerichtete Problemlösung erlauben. Diese Vorgehensmodelle untergliedern den Problemlösungsprozess in chronologisch sukzessiv verlaufende Teilschritte und schlagen für die mit diesen Teilschritten verbundenen Aufgaben Vorgehensweisen oder konkrete Lösungsmethoden vor (Krallmann, 2007; Haberfellner et al., 2015). Für diese Arbeit ist das Vorgehensmodell des System Engineering (SE) besonders vielversprechend. Das SE-Vorgehensmodell wird durch drei wesentliche Grundprinzipien charakterisiert. Das erste Prinzip, das Prinzip der Top-Down Betrachtung, postuliert eine systematische Betrachtung des Problembereichs vom „Groben zum Detail“ (Haberfellner et al., 2015). Bereits in diesem Prinzip spiegelt sich der starke Bezug des Vorgehensmodells zur systemtheoretischen Betrachtungsweise wider, indem der Diskursbereich in funktionale, miteinander interagierende Teilsysteme untergliedert wird. Wenig relevante Systemaspekte können so für die Betrachtung ausgeblendet oder zusammengefasst werden. Für diese Arbeit ist vergleichbares Top-Down-

---

Vorgehen sinnvoll, beispielsweise um das Gesamtplanungsproblem der Automobilterminalprozesse in einzelne Teilplanungsprobleme zu untergliedern und das Zusammenwirken dieser Teilsysteme zu analysieren.

Auch das zweite Grundprinzip, das Prinzip des Denkens in Varianten, welches darauf zielt, die Variabilität des Lösungskorridors zu erweitern und letztlich die Lösungsqualität zu erhöhen, ist für die Bearbeitung der Fragestellung ein zielführender Ansatz (Haberfellner et al., 2015). Die beschriebene systeminhärente Dynamik von selbststeuernden Systemen kann zu volatilen Systemverhalten und komplexen Interdependenzen zwischen den relevanten Steuerungsparametern führen. Unter diesem Gesichtspunkt ist eine variantenbasierte Entwicklung der Lösung und der Untersuchung der Wirkzusammenhänge wichtig, um dem angestrebten Ziel einer praxistauglichen Integration der Planungsprobleme gerecht zu werden.

Das letzte Grundprinzip des SE-Vorgehensmodells beschreibt die Vorgehenslogik des Vorgehensmodells. Es charakterisiert die Problemlösung als chronologische Abfolge abgeschlossener Phasen (Makro-Logik). Die sogenannte Mikro-Logik beschreibt als Detaillierung das Durchlaufen der einzelnen Phasen als wiederkehrenden Problemlösungszyklus (Haberfellner et al., 2015). Die übergeordnete Phasengliederung unterstützt eine klare Abgrenzung der Arbeitsschritte voneinander. Im Rahmen der geplanten Arbeit bedeutet das, dass angestrebte Forschungsergebnisse für die einzelnen Phasen klar im Vorfeld formuliert werden können.

Aus diesen Gründen wird für die methodische Erarbeitung das SE-Vorgehensmodell als Basis genutzt. Hierbei baut die übergeordnete Arbeitsstruktur auf der Makro-Logik auf. Auf der Ebene der detaillierten Bearbeitung der einzelnen Fragen wird entsprechend analog zum SE-Vorgehensmodell der Problemlösungszyklus angewendet, da dieser einen einheitlichen strukturellen Rahmen für die Bearbeitung bietet.

Die folgende Abbildung 1 zeigt die Struktur dieser Arbeit und setzt sie in Bezug zur Makro-Logik des SE-Vorgehensmodells, indem sie den einzelnen Zielebenen der Arbeit (deskriptives Ziel, praktisches Ziel, evaluatives Ziel und exploratives Ziel) den entsprechenden Phasen der Makro-Logik zugeordnet werden. Um die Abbildung nicht zu überfrachten, wurde darauf verzichtet, für jede der Arbeitsphasen einen Problemlösungszyklus darzustellen. Die Abbildung zeigt allerdings die unterschiedlichen Methoden, welche im jeweiligen Problemlösungszyklus genutzt werden. Die klassischen Phasen des SE-Vorgehensmodells zielen darauf ab, ein System von der Konzeption bis zur praktischen Implementierung zu unterstützen. Daher umfasst das SE-Vorgehensmodell ein umfänglicheres Spektrum von Bearbeitungsphasen, als es für die Erreichung der beschriebenen Ziele dieser Arbeit notwendig ist. Diese Arbeit zielt auf die Entwicklung einer geeigneten

Selbststeuerungsmethode für Automoterminals sowie die Ableitung von Anforderungen und Handlungsempfehlungen für eine erfolgreiche Überführung in die Praxis. Folglich ist eine Abgrenzung zum klassischen SE-Vorgehensmodell mit seinen üblichen Phasen Vorstudie, Hauptstudie, Detailstudien, Systembau, Systemeinführung und Abschluss notwendig. Die Phasen Systemeinführung und Abschluss beziehen sich direkt auf die Implementierung eines konkreten Systems und werden daher in dem geplanten Vorgehen dieser Arbeit nicht berücksichtigt (siehe roter Kasten in der Abbildung als Abgrenzung).

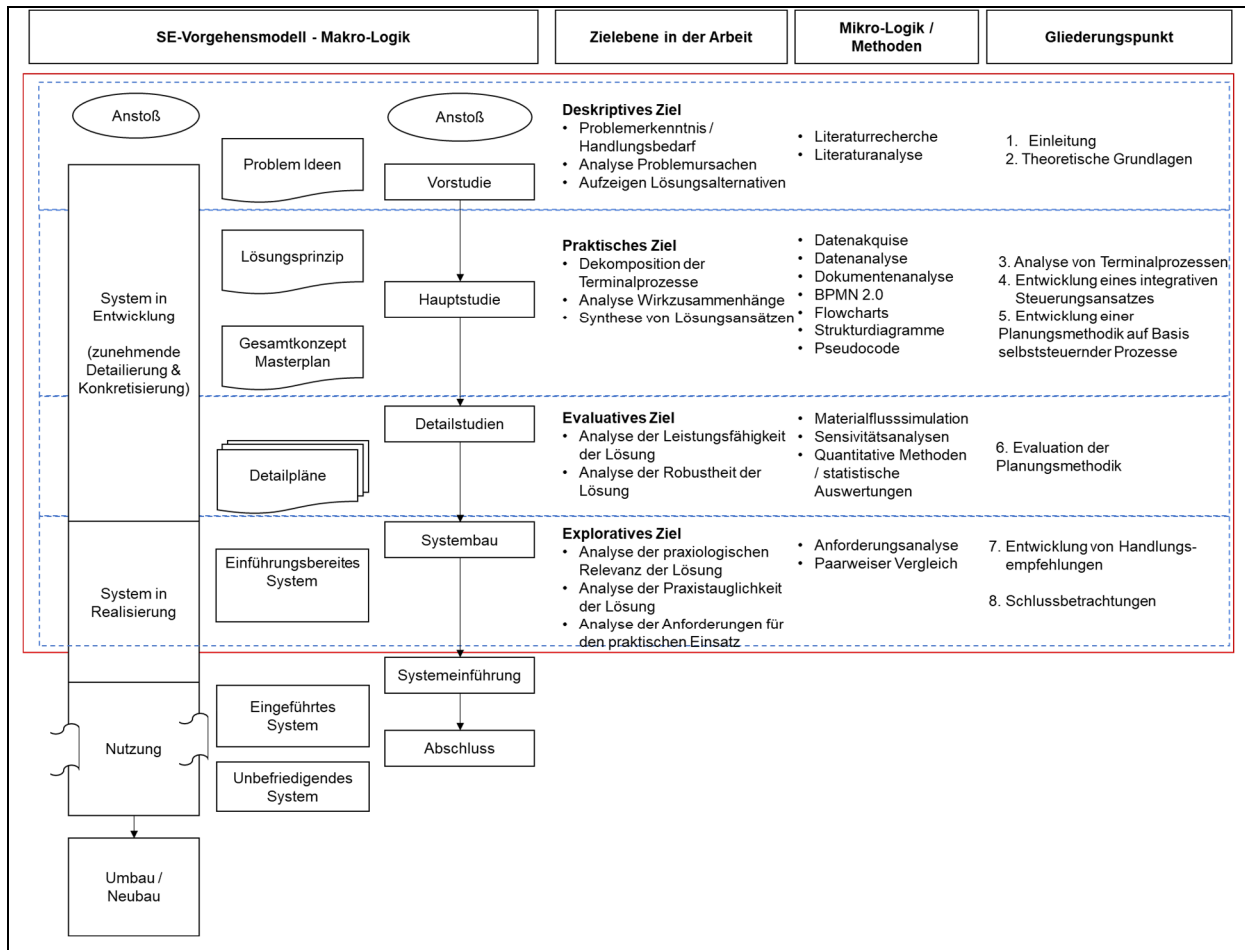


Abbildung 1: Vorgehen und Aufbau der Arbeit

Konkret ergibt sich hieraus folgende inhaltliche Zusammensetzung der Kapitel: In Kapitel 2 werden zunächst die theoretischen Grundlagen und notwendigen Begriffsdefinitionen erarbeitet. Auf dieser Grundlage sollen analog zu der Vorstudienphase im SE-Vorgehensmodell die Arbeitshypothesen (vgl. Kapitel 1.2) durch eine differenzierte Betrachtung von Terminalplanungsprozessen theoretisch verifiziert werden. Weiterhin soll das Konzept der Selbststeuerung als möglicher Lösungsansatz differenziert betrachtet werden, um das deskriptive Ziel dieser Arbeit zu erreichen.



---

Ausgehend von diesen Vorstudienresultaten als Aufsatzzpunkt sollen in der Hauptstudienphase in Kapitel 3, Kapitel 4 und Kapitel 5 die Erkenntnisse anhand eines realen Terminalbeispiels abgesichert und verdichtet werden. Hierbei werden insbesondere die operativen und die planerischen Prozesse in den Fokus gerückt. In der Hauptstudie werden die wesentlichen Anforderungen an potenzielle Lösungen abgeleitet und die aufgedeckten Wirkzusammenhänge dokumentiert. Auf dieser Grundlage wird eine Planungsmethodik auf Basis selbststeuernder logistischer Prozesse für den Problembereich konzipiert und beschrieben. Durch die Entwicklung und Beschreibung entsprechender Selbststeuerungsansätze wird das deskriptive Ziel dieser Arbeit erreicht.

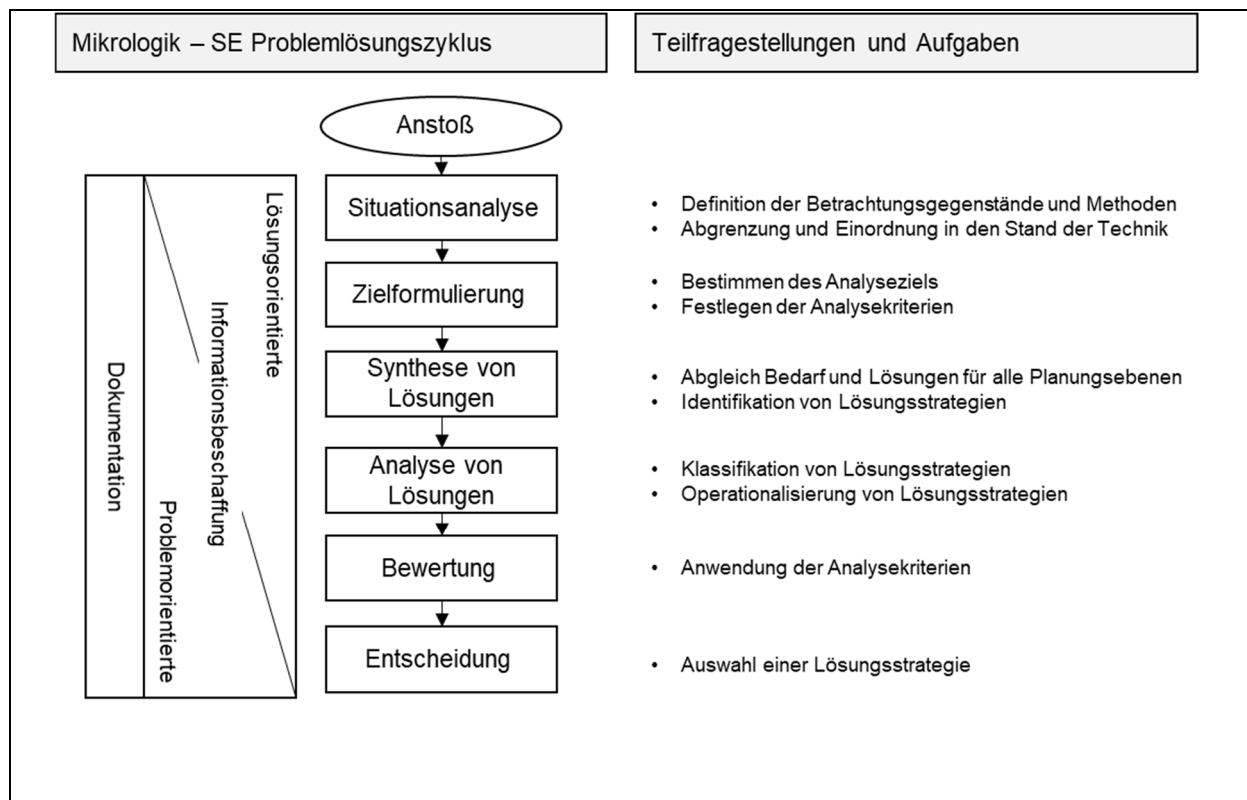
Die Bewertung der neuen Methodik erfolgt in der Phase der Detailstudien, in der systematisch untersucht wird, ob die Selbststeuerungsmethoden die definierten Anforderungen hinsichtlich ihrer logistischen Leistungsfähigkeit und ihrem Umgang mit Dynamik und Komplexität erfüllen können. Hierfür führt das Kapitel 6 ein Hypothesensystem für die Evaluation ein, welches alle Anforderungen abdeckt. Die Analyse adressiert zunächst ein generisches Modell, welches simulativ untersucht wird, um grundsätzliche Aussagen zu den Methoden zu ermöglichen. In einem weiteren Analyseschritt wird ein komplexes, detailreiches Modell eines real existierenden Terminals für die Untersuchung herangezogen. Dieser Schritt dient der Überprüfung und der Sicherstellung der Übertragbarkeit auf praxisrelevante Terminalsysteme.

Nach Abschluss der Detailstudien und dem damit verbundenen Erreichen des evaluativen Ziels wird in der Phase des Systembaus in Kapitel 7 die Übertragbarkeit in die Praxis adressiert. Aus den erzielten Resultaten werden zunächst die technischen und prozessualen Anforderungen abgeleitet. Zusammen mit den gewonnenen Kenntnissen über das Beispielterminal und den in Kapitel 2 erarbeiteten Grundlagen zu Terminalplanung und -betrieb wird abschließend ein Handlungsleitfaden für Praxisumsetzungen entwickelt. Das Kapitel 8 fasst final alle gewonnenen Resultate zusammen und setzt diese in Beziehung zu dem Gesamtziel und den Teilzielen dieser Arbeit.

## **2. Theoretische Grundlagen der Arbeit**

In diesem Kapitel sollen die theoretischen Grundlagen der Arbeit dargelegt und diskutiert werden. Im Hinblick auf das Erreichen des deskriptiven Ziels dieser Arbeit steht hierbei neben der definitorischen Abgrenzung von wichtigen Begrifflichkeiten vor allem die kritische Auseinandersetzung mit der Planung von Automobilterminals im Vordergrund. Hierauf aufbauend sollen mögliche Wirkzusammenhänge, welche ursächlich für die Verbesserungspotenziale von bestehenden Planungsansätzen sind, identifiziert werden.

Um das deskriptive Ziel zu erreichen, orientiert sich das Vorgehen der Analyse, dem bereits beschriebenen SE-Modell folgend, an dem Problemlösungszyklus nach Haberfellner et al. (2015) (Haberfellner et al., 2015). Die folgende Abbildung zeigt den Problemlösungszyklus und ordnet die bereits unter 1.4 bzw. die in Abbildung 1 beschriebenen Arbeitsinhalte sowie die hierfür verwendeten methodischen Ansätze in Bezug auf das deskriptive Ziel dieser Arbeit im Detail ein.



**Abbildung 2: Mikrologik der Vorstudienphase in Anlehnung an (Haberfellner et al., 2015)**

Im Rahmen der Situationsanalyse werden die für die Arbeit relevanten Betrachtungsgegenstände trennscharf definitorisch erarbeitet, gegeneinander abgegrenzt und in den Kontext des Stands der Forschung eingegliedert. Durch dieses Vorgehen wird trotz des vielschichtigen Betrachtungsgegenstands ein systematischer Zugang ermöglicht und ein umfassender Blick auf die in der Arbeit angewendeten Methoden gegeben. Insbesondere soll das Analyseobjekt Autoterminal klar greifbar gemacht werden. Neben einer Einordnung in den allgemeinen Hafen- und Terminalbegriff ist eine Einordnung in die Logistikforschung notwendig. Zu diesem Zweck wird eine definitorische Beschreibung des dieser Arbeit zugrundeliegenden Logistikverständnisses vorgenommen: Methodisch sind der Systembegriff und der hiermit verbundene Modellgedanke ein integraler Bestandteil dieses Logistikverständnisses. Auch ist der Systembegriff für die vorgehensbezogene Meta-Ebene

---

dieser Arbeit durch die Anlehnung an dem Systems-Engineering-Vorgehensmodell (SE-Modell) ein wesentlicher Bestandteil und soll deshalb klar definiert werden.

Ausgehend von dieser definitorisch angelegten Situationsanalyse wird in einer ersten Subsumtion das deskriptive Ziel der Arbeit verfeinert formuliert, indem eine strukturierte Analyse der theoretischen abgeleiteten Problemstellungen aufgestellt wird. Durch die Gegenüberstellung von Problemstellungen und identifizierten Lösungsmöglichkeiten sollen im Rahmen des Mikro-Logik-Schnitts „Synthese von Lösungen“ grundsätzliche Lösungsansätze gefunden und grob beschrieben werden. In dem darauffolgenden Analyseschritt werden diese Lösungsansätze zunächst klassifiziert und operationalisiert, um im Folgeschritt „Bewertung“ mittels der in der Zielformulierung definierten Analysekriterien zueinander in Beziehung gesetzt zu werden. Dieses Ergebnis dient als Ausgangspunkt für die nächste Phase in der Makro-Logik.

## **2.1 Systeme und Systembetrachtungen**

Definitorisch ist der Systembegriff für diese Arbeit von zentraler Bedeutung. Er ist einerseits ein integraler Bestandteil des gewählten SE-Vorgehensmodells nach Haberfellner et al. (Haberfellner et al., 2015) mit seiner Mikro- und Makro-Logik. Andererseits ist der Systembegriff die Basis für die Definition und die Analyse von automobilterminalbezogenen Planungsproblemen, ebenso wie für das Verständnis von selbststeuernden Logistiksystemen. Daher gibt das Kapitel 2.1 eine für diese Arbeit zugrundeliegende Definition des Systembegriffes. Hierauf aufbauend werden Merkmale von Systemen beschrieben sowie die Begriffe Dynamik, Komplexität und Robustheit eingeführt und abgegrenzt.

### **2.1.1 Definition des Systembegriffes**

Der Begriff des Systems wird in vielen wissenschaftlichen Disziplinen verwendet. Er ermöglicht die Untersuchung von realen und imaginären Objekten durch gedankliche Abstraktion, Abgrenzung von seiner Umwelt und hierarchischer Untergliederung dieser Objekte. Grundsätzlich kann diese gedanklich abstrahierte und abgegrenzte Abbildung eines Betrachtungsgegenstands bereits als System aufgefasst werden. In der Literatur existierende Systemdefinitionen ergänzen diese Aspekte um die Grundbestandteile Systemgrenze, Systemelemente, Beziehungen zwischen Systemelementen und die umgebende Systemumwelt (Haberfellner et al., 2015). Auch die Definitionen anderer Autoren verwenden explizit oder implizit äquivalente Bezeichnungen für die Bestandteile von Systemen (u.a. (Patzak, 1982),(Krallmann, 2007), (Wiendahl, 2009)). Durch diese einheitliche Beschreibung von einzelnen Systemelementen und ihrem Zusammenwirken ermöglicht die Systemtheorie eine abstrakte Beschreibung eines Untersuchungsgegenstands auf einer Meta-Ebene. Auch

---

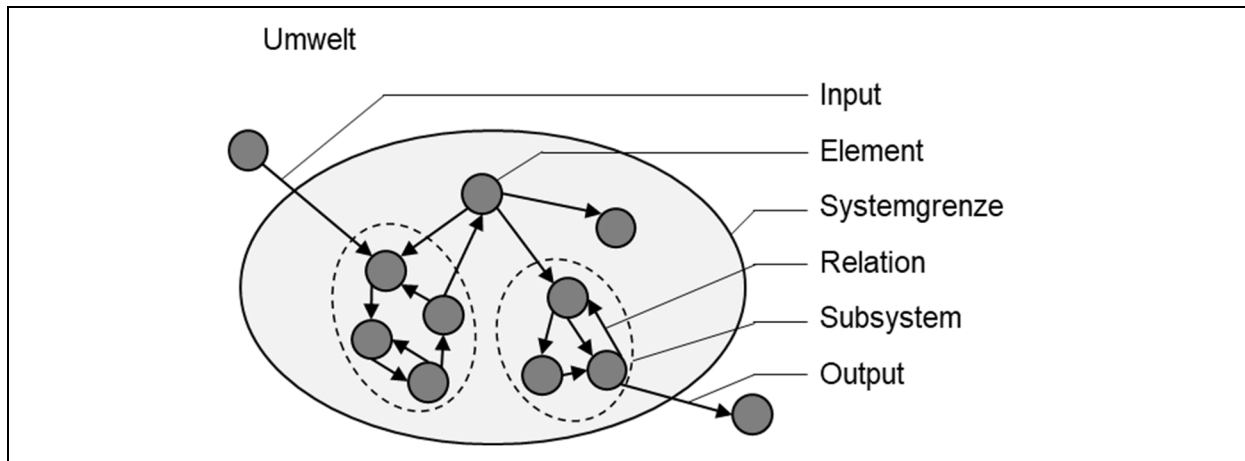
die Definition von Krallmann (2007) weist diese genannten Eigenschaften auf. Aufgrund ihrer umfassenden und präzisen Beschreibung wird diese Definition weiterhin als Grundlage für den Begriff System verwendet.

„Ein System besteht aus einer Menge (im mathematischen Sinne) von Elementen, die durch eine Menge von Relationen miteinander verbunden sind. Von seiner Umwelt wird es durch die Systemgrenze unterschieden. Der Einfluss eines Systems auf seine Umwelt stellt den Output, der Einfluss der Umwelt den Input des Systems dar.“(Krallmann, 2007)

Dieses Systemverständnis ermöglicht verschiedene Betrachtungsweisen auf das zu untersuchende reale Objekt. Zu nennen sind die Input-Output-Betrachtung und die wirkungsorientierte Betrachtung (Haberfellner et al., 2015). Die Input-Output-Betrachtung vernachlässigt die Klärung der Wirkmechanismen zwischen den einzelnen Systemelementen, sondern sie stellt die Wechselwirkungen des Systems mit seiner Umwelt in den Vordergrund (Bruns, 1991; Krallmann, 2007). Das System wird als Blackbox angesehen. Seine Interaktion mit der Umwelt wird durch eine Übertragungsfunktion, welche den Übergang des Systeminputs zu dem Systemoutput beschreibt, dargestellt.

In der wirkungsorientierten Betrachtung hingegen rücken die Wechselwirkungen zwischen den Elementen in den Fokus der Betrachtung. Mit dieser Herangehensweise soll ein Erkenntnisgewinn bezüglich der Ursachen, die zu einem bestimmten Systemverhalten führen, erzielt werden (Bossel, 2004). Dabei werden die Elemente des Systems genauer untersucht und gegebenenfalls weiter untergliedert oder zusammengefasst. Einzelne Elemente oder Gruppen von Elementen eines Systems können somit als eigenständige Systeme angesehen werden. Sie werden dann als Subsystem bezeichnet. Die Gliederung eines Systems in verschiedene Subsysteme wird Systemhierarchie genannt (Haberfellner et al., 2015).

Die Ursprünge der modernen Systemtheorie gehen auf Ludwig von Bertalanffy zurück, welcher durch die „allgemeine Systemtheorie“ versucht, komplexe biologische Zusammenhänge nicht durch isolierte Einzelphänomene, sondern durch das vernetzte Zusammenwirken dynamischer Einflussgrößen zu erklären (Diesner, 2015). Durch die Erweiterung des Systembegriffs bzw. durch die Synthese mit Konzepten der Kybernetik stellt die Systemtheorie einen interdisziplinären Erklärungsrahmen für komplexe, wechselwirkende Zusammenhänge bereit (Diesner, 2015). Die Abbildung 3 zeigt ein allgemeines System mit seinen Elementen und seinen internen und externen Verknüpfungen. Die Systemgrenze stellt die gedankliche Abgrenzung des Betrachtungsgegenstands zu seinem Kontext (Umwelt) dar. Innerhalb der Systemgrenzen sind die -elemente angeordnet. Die Verknüpfung von Elementen zeigt den wechselseitigen Austausch- und Wirkbeziehungen in Form von Relationen.



**Abbildung 3: System und Systemelemente (Haberfellner et al., 2015)**

Diese Wirkbeziehungen beschreiben die Interaktion der Systemelemente und das Systemverhalten. Die Interaktion eines Systems mit der Umwelt wird durch Input-Output-Beziehungen beschrieben. Für die Beschreibung komplexer Systeme kann eine Gruppierung mehrerer Systemelemente zu Subsystemen vorgenommen werden. Hierdurch besteht die Möglichkeit, das System hierarchisch zu untergliedern. Je nach Betrachtungsfokus kann ein Subsystem als eigenständiges System einer detaillierten Untersuchung zugeführt werden.

Auf dieser allgemeinen Grundlage werden in den Ingenieurwissenschaften Arbeitssysteme (z.B. Produktionssysteme oder auch Seehafenterminals) als sozio-technische Systeme aufgefasst und beschrieben. Nach Spur umfasst ein sozio-technisches System sowohl menschliche als auch technische Systemelemente (Spur, 2007). Folglich wird durch den Beschreibungsansatz eines sozio-technischen Systems die Interaktion zwischen menschlichen und technischen Einheiten beschrieben. Nach Ropohl sind diese Komponenten untrennbar miteinander verbunden und stehen in wechselseitiger Abhängigkeit (Ropohl, 2009). Sie können somit nur als Einheit betrachtet werden. Die bedingte Isolierbarkeit der einzelnen Systemelemente ist dem Begriff des sozio-technischen Systems inhärent.

Im Bereich der Logistik nimmt die Beschreibung von Strukturen als sozio-technisches System eine zentrale Rolle ein. Deswegen stellt die oben genannte Definition eines sozio-technischen Systems die Grundlage der Betrachtung in dieser Arbeit dar.

### 2.1.2 Dynamik, Komplexität und Robustheit als Eigenschaften von Systemen

Eng verknüpft mit dem Systembegriff sind die Begriffe Dynamik, Komplexität und Robustheit, welche auch für die Beschreibung von Logistik- und Terminalsystemen in der Literatur häufig als eine zentrale Herausforderung gesehen werden (Kirchhof, 2003; Voß et al., 2004; Stahlbock und Voß, 2007). Eine trennscharfe Unterscheidung der Begriffe untereinander ist

---

folglich für ein umfassendes Verständnis in Bezug auf Terminalplanungsprobleme unabdingbar.

### *2.1.2.1 Komplexität*

Der Begriff Komplexität wird in verschiedenen wissenschaftlichen Disziplinen, beispielsweise in der Physik, der Biologie oder auch der Soziologie verwendet. Hierbei wird dieser zwischen und innerhalb der Disziplinen jedoch teilweise unterschiedlich verwendet und verstanden. Im Bereich der Ingenieurwissenschaften werden oftmals die Begriffe Komplexität und Kompliziertheit vereinfachend miteinander synonym verwendet. Im Rahmen dieser Arbeit ist eine solche Betrachtungsweise zu stark verkürzend. Nach Ulrich und Probst besteht ein wesentlicher Unterschied zwischen Kompliziertheit und Komplexität im Systemverhalten in Bezug zur Betrachtungszeit (Ulrich und Probst, 1995). Ein komplexes System hat demnach nicht nur einen umfangreichen Systemaufbau (Komponenten und Relationen), sondern kann seinen Zustand im Verlauf der Zeit verändern. Insbesondere in Bezug auf die Systemzusammensetzung kann die Komplexität als strukturelles Merkmal eines Systems, welche durch die Anzahl der Elemente und der Anzahl Verbindungen zwischen ihnen determiniert wird, verstanden werden (Patzak, 1982). Schmidt beschreibt hierauf aufbauend den Komplexitätsbegriff als Eigenschaft eines Systems mit vielen Elementen, welches im Zeitverlauf sein Verhalten verändert (Schmidt, 2002). Eine wesentliche Eigenschaft eines komplexen Systems ist in diesem Zusammenhang, dass die Beziehungen zwischen den Systemelementen nicht stabil sind, sondern sich im Verlauf der Zeit ändern können. Hierdurch kann das System eine Vielzahl verschiedener Zustände annehmen (Schmidt, 2002; Sheard und Mostashari, 2009). Die Ursachen für diese instabilen, sich verändernden Beziehungen des Systems können sowohl in seiner Umwelt (systemexogen) als auch in dem System selbst (systemendogen) gefunden werden. Sowohl systemexogene als auch systemendogene Vorgänge können neue Verbindungen zwischen den Systemelementen verursachen. Das Verhalten des Systems verändert sich im Zuge der neuen Beziehungen (Reither, 1997). Um die Ursachen von systemischer Komplexität gegeneinander abgrenzen zu können, führt der Ansatz von Scheer (Scherer und Doberstein, 1996) die vier unterschiedlichen Erscheinungsformen von Komplexität: Verbindungskomplexität, Elementkomplexität, strukturelle und dynamische Komplexität ein. Die folgende Abbildung 4 verdeutlicht die Erscheinungsformen und setzt diese zu den jeweiligen Systemaspekten in Beziehung. Die Verbindungskomplexität bezieht sich hierbei auf die Relationen zwischen den Elementen und auf ihre hierarchische Ordnung. In der Regel besitzen stark hierarchische Systeme weniger Verbindungen zwischen den Elementen als heterarchische Systeme mit einer flachen Hierarchie. Diese Art von Verbindungskomplexität kann als Verhältnis der Anzahl Knoten zu der Anzahl Kanten quantifiziert werden (Krallmann, 2007).



---

Schwingungen und Dämpfung vollständig prognostiziert werden. Externe und interne Parameter sind deterministisch bekannt und können das Verhalten beschreiben. Der gleiche Aufbau für ein Pendel mit zwei Gelenken führt jedoch zu unvorhersagbaren zukünftigen Systemzuständen (Shinbrot et al., 1992). Die internen Wechselwirkungen der Kräfte an den Gelenken machen die Beschreibung zukünftiger Zustände unmöglich (Levien und Tan, 1993). Brosch fasst diesen Aspekt der Komplexität als Entropie auf, in dem ein System zunehmend komplexer ist, wenn einerseits die Informationsdichte abnimmt und andererseits die Unsicherheit über die Systemzustände zunimmt (Brosch, 2014). Auch in der Informatik wird der Komplexitätsbegriff verwendet. Hierbei wird die Komplexität als Eigenschaft eines algorithmischen Problems verstanden. Probleme und Algorithmen werden entsprechend ihrem Lösungsaufwand klassifiziert. Als Maß für die Zuordnung werden vornehmlich der Zeitverbrauch oder die Speichernutzung herangezogen. Durch die Problemklasse kann beschrieben werden, ob ein Problem praktisch lösbar ist (z.B. P-Problem). Neben diesen grundsätzlich gut lösbaren Problemklassen existieren auch Klassen, bei denen der Rechenaufwand exponentiell mit der Problemgröße wächst (z.B. NP-vollständige Probleme). Berechnungen von optimalen Lösungen sind für diese Probleme nur für kleine Probleminstanzen möglich. Bezugnehmend auf die oben beschriebene Komplexitätseinteilung nach Scherer (1996) verbindet diese Betrachtungsweise die Perspektiven der Verbindungskomplexität, und der strukturellen Komplexität. Je nach Problemklasse können für große Instanzen (strukturelle und auch implizit die Verbindungskomplexität) nicht in adäquater Zeit Prognosen über zukünftige Zustände (dynamische Komplexität) mittels eines zugrundeliegenden Brechungsmodells generiert werden. Für die weitere Ausarbeitung wird der Komplexitätsbegriff von Scherer und Doberstein herangezogen, da dieser für sozio-technische Systeme einen umfassenden Rahmen bietet.

### *2.1.2.2 Dynamik*

Der Terminus Dynamik eines Systems ist trotz der Wortähnlichkeit klar von der dynamischen Komplexität eines Systems zu trennen. Die dynamische Komplexität erklärt den Rahmen von Struktur und Zustandsveränderungen. Sie beschreibt, dass im zeitlichen Verlauf die Möglichkeit besteht, dass die Struktur und die Systemzustände veränderlich sein und somit zu einem ebenfalls im Zeitverlauf variierenden Systemverhalten führen können (Reither, 1997). Der Begriff Dynamik hingegen bezieht sich auf das geplante oder das beobachtete Systemverhalten im zeitlichen Verlauf. Üblicherweise werden die Beobachtungen auf für das System relevante Zielgrößen bezogen, welche in der Regel Indikatoren für die Leistungsfähigkeit des betrachteten Systems (Systemvariablen) sind. Forrester (2013) klassifiziert dieses zeitliche Systemverhalten nach stabilen und dynamischen Systemen. Stabile Systeme streben nach dem Einfluss äußerer Störungen, einen stabilen stationären



---

Zustand an. Dem gegenüber steht das dynamische Systemverhalten, bei dem das System instabil reagieren kann. Bei diesen instabilen Zuständen kann das System entweder stationäres oder transientes Verhalten zeigen (Bala et al., 2017). Hierbei kann sich bei stationären Systemzuständen ein wechselndes, sich über den Verlauf der Zeit wiederholendes Verhalten zeigen, während bei transienten Zuständen das Systemverhalten im Verlauf der Zeit bei ohne Wiederholungen variiert (Forrester, 2013).

### *2.1.2.3 Stabilität und Robustheit von Systemen*

Die Verwendung der Begriffe Stabilität und Robustheit im Zusammenhang mit Systemen ist, ähnlich wie der Komplexitätsbegriff, durch unterschiedliche Verwendungen in der Literatur gekennzeichnet. Grundsätzlich werden diese Begriffe verwendet, um das zeitliche Systemverhalten zu beschreiben. Aus mathematischer Perspektive beschreibt die Stabilität eines Systems, dass alle relevanten Systemparameter im zeitlichen Verlauf beschränkt sind und nicht über alle Maße anwachsen. Erst wenn unter gegebenen Parametern eine solch gebundene Entwicklung aller Systemvariablen nachgewiesen werden kann, wird von der Stabilität eines Systems gesprochen (Dashkovskiy et al., 2012). Je nach Art und Komplexität der Beschreibungsmöglichkeiten des Systems ist eine mathematische Beurteilung der Stabilität nicht oder nur eingeschränkt möglich (Han, 2002; Dolgui et al., 2018). So kann die Berücksichtigung von stochastischen Einflüssen und Wechselwirkungen dazu führen, dass kein Stabilitätsnachweis möglich ist, bzw. kein Ansatz zum Nachweis bekannt ist (Scholz-Reiter et al., 2006). Mittels numerischer Verfahren (Simulation) kann dennoch das Zeitverhalten für diese Systeme in vordefinierten Zeitbereichen untersucht und ein Nachweis über Systemrobustheit in dem betreffenden Zeitfenster vorgenommen werden.

Zeigen die angewendeten numerischen Verfahren kein konstantes Über- oder Unterschreiten der für die Betrachtung definierten Grenzwerte, so kann das Verhalten des Systems als robust gegenüber dem gewählten Parametersatz gesehen werden (z.B. (Burduk, 2014; Wei et al., 2015)). Auch für Systeme, für welche analytisch die Stabilität nachgewiesen werden konnte, kann eine numerische Analyse herangezogen werden, um die gefundenen Parameter weiter zu verfeinern (Scholz-Reiter et al., 2011a).

Im Rahmen dieser Arbeit werden die Begriffe Stabilität und Robustheit entsprechend der vorstehenden Definition verstanden. Während die Stabilität einen mathematischen Nachweis über die garantierte Gebundenheit von Systemzuständen beschreibt, bezieht sich der Begriff Robustheit auf einen zeitlichen Ausschnitt, für welchen ein numerischer Nachweis erbracht werden kann, dass die betrachteten Systemgrößen im Zuge der Dynamik nicht unbeschränkt wachsen.

---

## 2.2 Abbildung von Systemen und Modellbildung

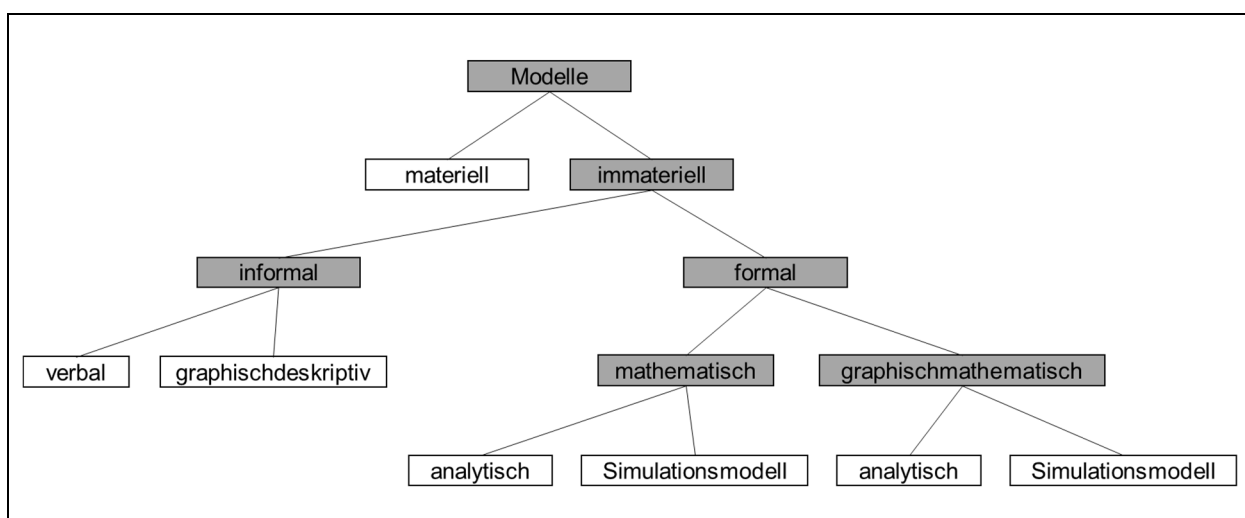
Modelle sind wesentliche Hilfsmittel für die Analyse der Wirkzusammenhänge innerhalb von Systemen sowie für das zugrundeliegende Systemverhalten. Hierbei stellt ein Modell immer eine gedankliche Abstraktion des Systems dar und vereinfacht somit Systemaspekte, indem lediglich relevante Teilaspekte aufgegriffen werden (Patzak, 1982). Ein Modell kann somit wiederum als ein System aufgefasst werden, welches ein anderes System für gezielte Analysen abbildet. Im Zuge der Modellerstellung abstrahiert der Modellierer das abzubildende System und berücksichtigt nur die für die Betrachtung relevanten Elemente (Muller et al., 2012; Haberfellner et al., 2015). Die Komplexität des Systems in ihren unterschiedlichen Erscheinungsformen (Strukturell, Verbindungen der Elemente, Elementkomplexität oder auch die dynamische Komplexität) kann durch diesen gedanklichen Abstraktionsschritt verringert und somit leichter einer Analyse zugänglich gemacht werden (Haberfellner et al., 2015; Grimme und Bossek, 2018). Nach Stachowiak (1973) besitzen Modelle grundsätzlich drei Eigenschaften (das Verkürzungsmerkmal, das Abbildungsmerkmal und das pragmatische Merkmal), welche auf diesen Abstraktionsprozess zurückzuführen sind (Stachowiak, 1973). Das Abbildungsmerkmal besagt, dass jedes Modell stets mit dem Ziel ein anderes Objekt oder System zu repräsentieren generiert wird. Das Verkürzungsmerkmal beschreibt, dass durch die Abstraktion der Modellbildung die Komplexität gezielt verringert wird (Muller et al., 2012). Durch diese Vereinfachung des ursprünglichen Systems kann das Modell in seiner Struktur ggf. nicht mit dem Original übereinstimmen. Hierbei sind zwei mögliche strukturelle Ausprägungen zu unterscheiden (Stachowiak, 1973). Bei isomorphen Modellen stimmen die Struktur des Originals und des Modells exakt überein, während homomorphe Modelle strukturelle Abweichungen aufweisen (Patzak, 1982). Das pragmatische Merkmal beschreibt, dass Modelle eines Systems erstellt werden, um unter bestimmten Rahmenbedingungen das Original durch das Modell zum Erkenntnisgewinn zu ersetzen (Stachowiak, 1973). Selic ergänzt diese grundlegenden Modellmerkmale um die Eigenschaften Abstraktion, Verständlichkeit, Genauigkeit, Vorhersagbarkeit und Kostenrelevanz (Selic, 2003). Während die Kriterien Abstraktion und Verständlichkeit inhaltlich eine starke Überdeckung mit dem verkürzenden und dem pragmatischen Merkmal aufweisen, stellen die Erweiterungen Genauigkeit, Vorhersagbarkeit und Kostenrelevanz für diese Arbeit wichtige zusätzliche Eigenschaften eines Modells dar. Die Forderung nach der Modellgenauigkeit verdeutlicht das Bestreben nach der möglichst exakten Abbildung der relevanten Systemeigenschaften durch das Modell. Auch die Vorhersagbarkeit ist von hoher Relevanz. Durch die Vorhersagbarkeit wird sichergestellt, dass das Systemverhalten entsprechend abgebildet wird und Analyseergebnisse dementsprechend zukünftig beliebig reproduzierbar sind. Die Relevanz von Kosten verdeutlicht, dass Experimente und der Gewinn von Erkenntnissen auch unter Berücksichtigung der hierfür benötigten Ressourcen gesehen werden müssen. Würde eine

---

modellhafte Betrachtung kostenintensiver als eine Beobachtung am realen System sein, käme eine Modellbildung demnach nicht in Betracht.

Neben diesen einenden Modellmerkmalen, welche allen Modellen gemein sind, existieren verschiedene Klassifikationsansätze zur Differenzierung von Modelltypen. Eine übergeordnete Einteilung von Modellen erlaubt die Differenzierung nach dem Verwendungszweck in deskriptive Modelle und spezifizierende Modelle (Seidewitz, 2003; Muller et al., 2012). Während deskriptive Modelle versuchen, Aspekte eines Systems nach der Beobachtung zu beschreiben, zielen spezifizierende Modelle auf die funktionale Beschreibung der relevanten Systemaspekte und der Bestimmung von zukünftigen Systemzuständen (Gutenschwager et al., 2017). Aufgrund dieser Eigenschaft werden in den ingenieurwissenschaftlichen Disziplinen überwiegend spezifizierende Erklärungsmodelle herangezogen (Seidewitz, 2003). Die Gruppe der spezifizierenden Erklärungsmodelle kann hinsichtlich ihres funktionalen Charakters weiter differenziert werden. Die wesentlichen Unterscheidungskriterien sind nach Page (Page, 1991): Die Art des Abbildungsmediums, die Art der Zustandsübergänge und Zeitverhalten.

Die Art des Abbildungsmediums beschreibt, auf welche Weise das Modell repräsentiert wird. Zu differenzieren ist zwischen materiellen und immateriellen Abbildungen. Zu den materiellen Abbildungen zählen maßstäbliche und nicht maßstäbliche physisch existierende Objekte, welche ein reales Original repräsentieren (z.B. Fahrzeug- oder Gebäudemodelle). In Bezug auf die Abbildung von Systemen (logistischen Systemen im Speziellen), wird in der Regel zumeist auf immaterielle Abbildungsformen zurückgegriffen. Die folgende Abbildung 5 setzt materielle und immaterielle Modelle zum Modellbegriff in Beziehung und differenziert insbesondere immaterielle Modelle.



**Abbildung 5: Klassifikation von Modellen nach Abbildungsmedium (Page, 1991)**

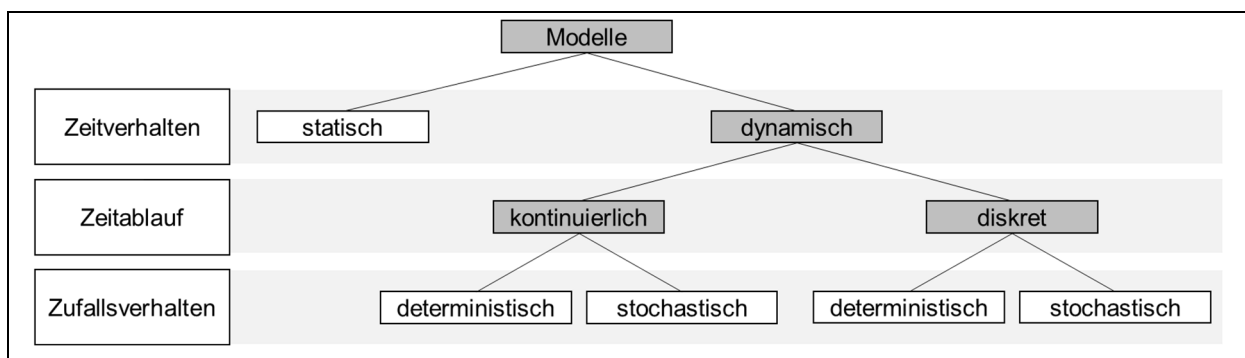
---

Immaterielle Modelle versuchen die relevanten Systemeigenschaften und sein Verhalten durch eine nicht gegenständliche Darstellungs- und Beschreibungsform zu erfassen. Die Art der Beschreibung kann formalisiert, im Sinne von durch Metakonventionen wie beispielsweise mathematische Ausdrücke oder informal erfolgen. Eine informale Beschreibung bezieht sich zumeist auf eine konkrete Problemstellung oder Probleminstanz und beschreibt die Systemeigenschaften verbal oder durch grafischdeskriptive Elemente. In der Regel werden bei informellen Modellen zumeist Mischformen verwendet. Ein Beispiel für ein informelles Modell kann in einer klassischen Gebrauchsanweisung gesehen werden. Ebenfalls zu den informellen grafischdeskriptiven Modellen können auch Prozessmodelle als Abbildung eines Ablaufes innerhalb eines sozio-technischen Systems gezählt werden. Diese Form der Modellbildung und Abbildung von Systembestandteilen ist aus methodischer Sicht ein weiteres wichtiges Werkzeug der Analyse im Rahmen dieser Arbeit. Prozessmodelle, wie beispielsweise die Business Process Modelling Notation (BPMN 2.0) zielen auf eine visuelle Ablaufbeschreibung durch eine grafisch ordnende Darstellungsweise (z.B. rollenbezogene „Swimlane-Diagramme), eine transparente Zuordnung von Aktionen zu Rollen (Akteuren), bei gleichzeitigem Erhalt einer übersichtlichen Darstellung der Prozesslogik und des Prozessverlaufs (Allweyer, 2016). Weitere Vertreter von informellen Modellen sind spezifisch detaillierte Darstellungen wie Pseudocode und Strukturdiagramme (Nassi-Scheidermann-Diagramme) (DIN, 1983, 1985; Diehl, 2007).

Gegenüber informellen Modellen ist der Gruppe der formalen Modelle gemein, dass die Art der Beschreibung von übergeordneten Konventionen geprägt und somit formalisiert ist. Die Gruppe der formalen Modelle kann weiterhin in rein mathematische und in grafisch mathematische Modelle unterschieden werden. Diese Unterscheidung zielt weniger auf die Unterschiede in der mathematischen Formulierung als direkt auf das Abbildungsmedium, bzw. auf die Systemvisualisierung. Während rein mathematisch formulierte Modelle, wie beispielsweise Differenzialgleichungssysteme zur Beschreibung des Dämpfungsverhaltens von Stoßdämpfern ausschließlich eine formelbasierte Beschreibung anstreben, nutzen grafisch mathematische Modelle zusätzlich formalisierte grafische Beschreibungsformen und die hiermit verbundene Berechnungsmodelle. Beispielhaft wird an dieser Stelle auf die Modellierung mittels Petri-Netzen, zellulären Automaten oder Warteschlangennetzwerken verwiesen (Abel, 1990; Langner et al., 1997; Wenzel, 2018).

Im Allgemeinen existieren sowohl für rein mathematische Modelle als auch für grafischdeskriptive Modelle einerseits analytische Lösungsverfahren als auch numerische (simulative) Ansätze. Bei einem Simulationsmodell werden den betrachteten Modellelementen sogenannte Modellvariablen zugeordnet. Neue Modellzustände werden durch die Berechnung neuer Werte für die Modellvariablen bestimmt. Die rechnerische Veränderung der Werte der

Modellvariablen wird als Zustandsübergang bezeichnet (Bossel, 2004; Klee und Randal, 2018). Analytische Lösungen beziehen sich auf eine formal analytische Problemlösung und kann in der Regel auf gleiche Problemklassen übertragen werden. Frank (1999) unterscheidet in diesem Kontext weiter nach analytischen und algorithmischen Modellen (Frank, 1999). Hierbei basieren die analytischen Modelle auf Differenzialgleichungen oder algebraischen Gleichungen, welche aufgrund ihrer Lösungskomplexität einer direkteren mathematischen Lösung zugänglich sind. Demgegenüber stehen algorithmische Modelle, welche durch numerische Lösungsverfahren berechnet werden müssen und aufgrund ihrer mathematischen Komplexität nicht analytisch zu lösen sind. Diese allgemeine Form einer algorithmischen Modellberechnung kann als Simulation im weiteren Sinne aufgefasst werden (Page, 1991; Klee und Randal, 2018). Demnach werden durch den Ablauf einer algorithmischen Berechnungsfolge die relevanten Modellvariablen berechnet und üblicherweise im zeitlichen Verlauf betrachtet. Der Übergang der Zustände der Modellvariablen kann hierbei auf verschiedene Weise vollzogen werden und ist somit ein weiteres Klassifikationsmerkmal von Modellen. Bei kontinuierlichen Modellen beschreiben stetige Funktionen die Veränderungen von Zustandsvariablen (Bossel, 2004; Gutenschwager et al., 2017). Dem entgegen werden in diskreten Modellen Zustandsveränderungen als nicht stetige Wertefolge einer unabhängigen Funktion dargestellt. Der Wechsel von Zuständen wird hier durch sprunghafte Veränderungen der Modellvariablen vollzogen (Fishman, 2001; Tako und Robinson, 2009). Die folgende Abbildung 6 nimmt zur genaueren Unterscheidung eine weitere Klassifikation nach Zustandsübergängen vor und reichert diese um das Zeitverhalten des Modells an. Üblicherweise beziehen sich die Veränderungen der Modellvariablen explizit (z.B. über einen direkten funktionalen Zusammenhang) auf die Zeit. Hiervon ist in den meisten Fällen auch die Repräsentation der Zeit, als eine zentrale Modellvariable, betroffen. Während in kontinuierlichen Modellen häufig die Zeit als stetig monoton wachsende lineare Funktion verstanden wird, entwickelt sie sich in diskreten Modellen oftmals sprunghaft in nicht äquidistanten Zeitschritten voran (Gutenschwager et al., 2017).



**Abbildung 6: Klassifikation nach Zustandsübergang und Zeitverhalten in Anlehnung an (Page, 1991) und (Reggelin, 2011)**

---

Diese Klassifikation nach Zustandsübergängen stellt die Grundlage der Funktionsweise von computerbasierten Simulationsmodellen dar und ist folglich bei der Betrachtung der Auswahl einer Modellart von besonderer Bedeutung, da die Wahl eines Softwaretools stark abhängig von dem geplanten Einsatzgebiet und den Präferenzen des späteren Anwenders ist (Morecroft und Robinson, 2005; Tako und Robinson, 2009; Hoad und Kunc, 2018). Nach dem pragmatischen Merkmal soll mittels eines Modells ein Erkenntnisgewinn bezüglich eines Systems ermöglicht werden. Für qualitative Erkenntnisse können informale Modelle ausreichen. In dieser Arbeit sollen jedoch neben qualitativen auch quantitative Analysen an Modellen von Autoterminals durchgeführt werden. Daher ist die Nutzung von entsprechenden quantitativen Modellierungsansätzen zielführend. Um eine geeignete Modellierungsmethode auswählen zu können, soll im Folgenden detailliert auf die verschiedenen Arten und Eigenschaften von Simulationsmodellen eingegangen werden.

## **2.3 Simulationsmodelle**

Simulationsmodelle kommen in vielen ingenieurwissenschaftlichen Fragestellungen für die Abbildung von relevanten Modellparametern im zeitlichen Verlauf zum Einsatz (Reggelin, 2011; Gutenschwager et al., 2017; Wenzel, 2018). Neben Anwendungsfällen im originären Diskursbereich dieser Arbeit – der Logistik – können zahlreiche Anwendungen in anderen Bereichen wie der Mechanik (z.B. (Chen et al., 2016; Tao et al., 2018)), der Elektrotechnik (z.B. (Baker, 2005; Parma und Dinavahi, 2007)) oder etwa der Thermodynamik (z.B. (Harvey und Gheribi, 2014; Herdes et al., 2015)) gefunden werden. Gemäß der bereits genannten Modellklassifikation nach Art des Zustandsübergangs können auch Simulationsmethoden entsprechend ihrer grundlegenden Funktionsweise klassifiziert werden. Nach Gutenschwager et al. kann zwischen kontinuierlichen und ereignisdiskreten Simulationsmodellen unterschieden werden (Gutenschwager et al., 2017). Überdies sind auch Mischformen aus beiden Modellarten für spezifische Anwendungsfälle in Form sogenannter Hybrider-Simulationsmodelle anzutreffen. Sie beinhalten sowohl kontinuierliche als auch diskrete Aspekte (van der Schaft und Schumacher, 2000; Bergero und Kofman, 2011). Die Zeitdomäne (diskret und kontinuierlich) wird in diesen hybriden Modellen mittels spezifischen Quantisierungs- und Dequantisierungsansätzen ineinander überführt (van der Schaft und Schumacher, 2000; Torrisi und Bemporad, 2004).

### **2.3.1 Kontinuierliche Simulationsmodelle**

In kontinuierlichen Modellen werden die Zustandsübergänge durch stetige Funktionen in Abhängigkeit der Zeit modelliert. Ein Systemelement (Modellvariable) kann in einem kontinuierlichen Modell bildlich als ein Behälter mit kontinuierlichem Zu- und Ablauf verstanden werden. Der Zustand dieses Systemelements wird durch die Füllmenge zu einem Zeitpunkt  $t$

---

beschrieben. Durch den Ab- und Zulauf wird der Inhalt des Systemelements kontinuierlich verändert (Bala et al., 2017). Mittels der Verknüpfung dieser Grundelemente (Modellvariable, Zugangsrate und Abgangsrate) kann ein kontinuierliches Modell eines Systems erzeugt werden. Die Verknüpfung von diesen Modellelementen erfolgt mittels der Formulierung von drei unterschiedlichen Gleichungsarten. Diese Gleichungen können auf den Zu- oder Ablauf eines anderen Modellelements wirken (Smith und Corripio, 2006). Hierdurch werden wechselseitige Wirkungen von den Modellelementen untereinander abgebildet. Die Art der Modellbildung ist eng an einer mathematischen Modellbildung mittels gewöhnlicher Differenzialgleichungen angelehnt. Daher kann die computergestützte Berechnung solcher Differenzialgleichungssysteme als kontinuierliche Simulation angesehen werden. Mit dem System Dynamics (SD) Ansatz hat Forrester einen kontinuierlichen Modellierungs- und Analyseansatz formuliert, welcher gemäß Abbildung 5 als grafisch-mathematischer Ansatz zu verstehen ist (Forrester, 2007, 2013). Systems Dynamics ermöglicht, die Zusammenhänge in einem System durch ein Wirkdiagramm abzubilden und diese formal durch, Modellvariablen, Zugangs- und Abgangsraten zu beschreiben. Durch die formalisierte Abbildung von Parametern und die beschreibenden Abhängigkeiten der Zustands- und Flussgrößen bilden diese Modelle das dynamische Verhalten ab. Als mögliche Anwendungsbereiche für System Dynamics Modelle werden in der Literatur vielfältige Einsatzmöglichkeiten (z.B., Gesundheitssektor, makroökonomische Modelle oder logistische Lieferketten) beschrieben (Bala et al., 2017; Davahli et al., 2020). Als ein Hauptanwendungsfeld werden von vielen Autoren eher makroskopische Modelle gesehen, welche einen starken Fokus auf langfristige strategische Entscheidungsprobleme, wie sie beispielsweise im Supply-Chain-Management zu finden sind (Cosenz und Noto, 2016). Aufgrund der systematischen Fokussierung der Ursache-Wirkungs-Beziehungen als integraler Modellbestandteil bieten SD-Modelle die Möglichkeit, dynamische Wechselwirkungen sowohl grafisch-qualitativ als auch mathematisch quantitativ abzubilden (Shepherd, 2014). Durch die zugrundeliegende technische Nutzung von Flussgleichungen können SD-Modelle allerdings nur eingeschränkt Fallunterscheidungen abbilden, die oftmals für die detailreiche Abbildung von operativen Fragestellungen notwendig sind (Morecroft und Robinson, 2005; Shepherd, 2014).

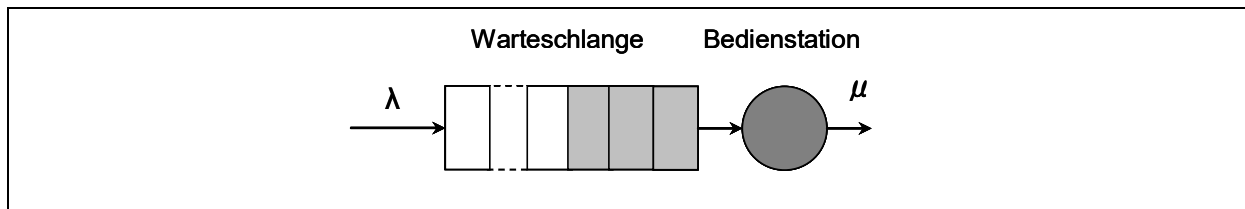
Technisch gesehen werden die Zustandsgleichungen in Abhängigkeit der Flussgleichungen als eine mathematische Folge aufgefasst und sukzessive berechnet. Bei Modellen, welche viele Abhängigkeiten zwischen den Zu- und Abgangsraten und den weiteren Variablen aufweisen, können nicht analytisch lösbare Integralgleichungen auftreten. In diesen Fällen ist eine simulative Lösung beispielsweise durch Nutzung von numerischen Integrationsverfahren, z. B. dem Runge-Kutta oder der Euler-Cauchy Integration, anzuwenden, wie sie den kontinuierlichen Simulationsimplementierungen üblicherweise zugrunde liegen (Bossel, 2004; Kasperska und Słota, 2004; Zawadzki und Pytlak, 2011).

---

### 2.3.2 Ereignisdiskrete Simulationsmodelle

Im Gegensatz zu kontinuierlichen Simulationen adressieren ereignisdiskrete Simulationsmodelle die Zeitdomäne in anderer Art und Weise. Wie bereits der Abbildung 6 zu entnehmen ist, werden ereignisdiskrete Simulationsmodelle durch eine diskrete Modellierung der Zeitschritte charakterisiert. Die Zeitpunkte der Zustandsänderungen sind in diesen Modellen nicht kontinuierlich im Zeitverlauf, sondern sie treten in Form von Ereignissen auf. Ein Ereignis beschreibt alle Zustandsveränderungen des Modells zu einem gewissen Ereigniszeitpunkt. Ein Ereignis kann durch sein Auftreten andere Ereignisse hervorrufen (Fishman, 2001; Schriber et al., 2013).

Die mathematischen Wurzeln von ereignisdiskreten Simulationsmodellen können in der Warteschlangentheorie gesehen werden, bei der der Ereignisbegriff ebenfalls von zentraler Bedeutung ist (Banks, 2005). Hier werden Vorgänge, wie sie beispielsweise an Postschaltern vorkommen, modelliert. Ein einfaches Modell dieser Art, ein M/M/1 Modell, ist in der Abbildung 7 dargestellt. Es besteht aus einem Warteraum (z.B. Bereich vor dem Postschalter), einer Bedienstation (z.B. Postbeamter), einer Bedienrate (z.B. Arbeitsgeschwindigkeit des Postbeamten) und der Ankunftsrate (z.B. Ankunftshäufigkeit von Kunden) (Gelenbe und Pujolle, 1998).



**Abbildung 7: Warteschlangenmodell (Bose, 2002)**

Die Ankunftsrate  $\lambda$  beschreibt, mit welcher Häufigkeit sich Kunden in die Warteschlange einreihen. Dieser Prozess kann sowohl durch stochastische Vorgänge mittels Wahrscheinlichkeitsverteilungen, als auch durch deterministische Vorgaben in das Modell implementiert werden (Fishman, 2001). Die Ankunft eines Kunden in der Warteschlange stellt ein Ereignis dar. Durch die Ankunft zu einem definierten Zeitpunkt wird der Bestand der Warteschlange schlagartig um eine Einheit erhöht. Dieses Ereignis löst wiederum andere Ereignisse aus. Bei einer leeren Warteschlange wird nach dem Eintreffen eines Kunden der Bearbeitungsvorgang gestartet. Die Bedienrate  $\mu$  kann hierbei ebenso wie die Ankunftsrate  $\lambda$  deterministisch oder stochastisch sein. Hierbei die Größen  $\mu$  und  $\lambda$  den Zustand des Warteraums. Sie beschreiben Ereignisse, welche eine diskrete Zustandsveränderung zur Folge haben.



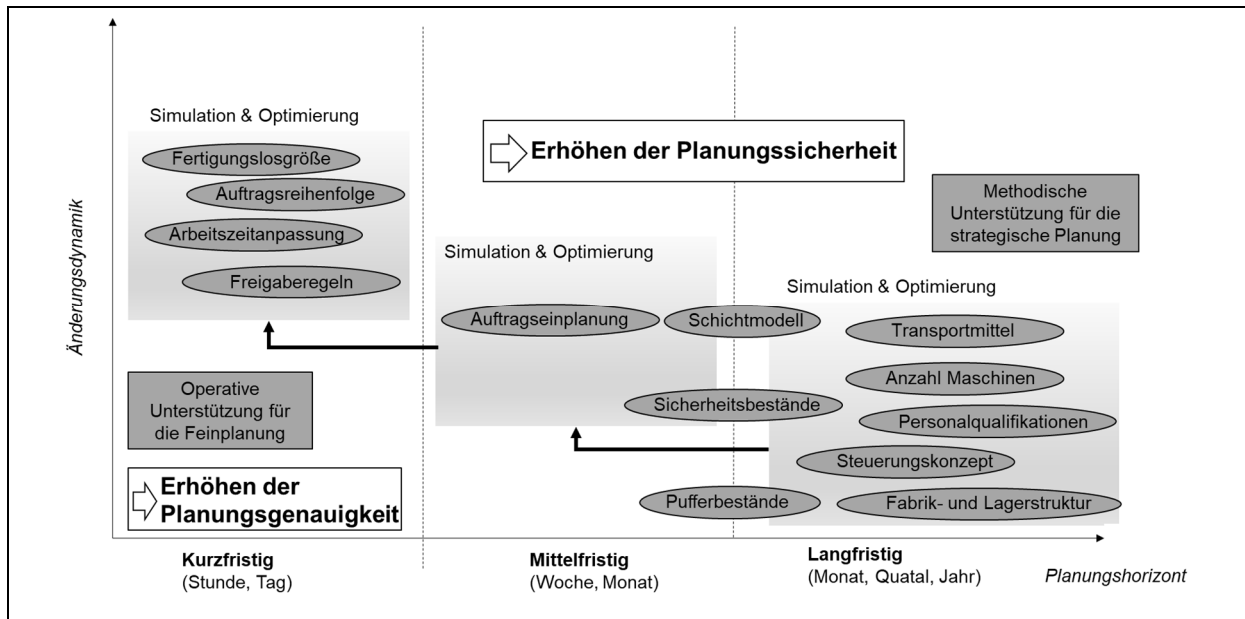
---

Komplexere Systeme können durch multiple, miteinander verknüpfte Warteschlangen modelliert werden. Ein solcher Zusammenschluss von Warteschlangensystemen wird Warteschlangen- oder auch Bediennetzwerk genannt (Banks, 2005; Gutenschwager et al., 2017). Eine rein mathematische Betrachtung einzelner Warteschlangen ist bereits oftmals aufwendig. Die formale Analysekomplexität steigt konsequenterweise um ein Vielfaches bei der Betrachtung kombinierter Warteschlangen-Netzwerke. Daher ist die analytische Untersuchung solcher Netzwerke sehr aufwendig und oftmals nur mit Einschränkungen möglich. Bei zu komplexen Modellen ist eine analytische Untersuchung oftmals nicht umsetzbar. Hier bieten ereignisdiskrete Simulationsprogramme einen Weg, die Modelle numerisch zu analysieren (Nicol, 1988; Page, 1991; Fu, 2002; Banks, 2005);

Um eine solch numerische Lösung zu ermöglichen, besitzen ereignisdiskrete Simulationswerkzeuge neben den genannten Grundelementen Ankunftsrate, Warteschlange, Bedienstation und Bedienrate, eine Ereignisliste und eine virtuelle Uhr. In der Ereignisliste werden zu jedem Zeitpunkt alle künftigen Ereignisse, die bereits durch Berechnungen bekannt sind, chronologisch aufgeführt (Banks, 2005; Schriber et al., 2013). Wurden die Effekte eines neuen Ereignisses simuliert, werden in die Ereignisliste die neuen Ereignisse, welche als Folge des vorangegangenen Ereignisses hervorgerufen werden, eingetragen und die virtuelle Uhr auf den nächsten Ereigniszeitpunkt gesetzt (Fishman, 2001). Durch das sukzessive Abarbeiten der Ereignisliste und die sprunghafte Veränderung der Systemzustände und der Systemzeit können mit möglichst geringer Rechenintensität die modellierten Vorgänge abgebildet und evaluiert werden (Banks, 2005). In der Praxis und in der Literatur können eine Vielzahl von verschiedenen Softwareimplementierungen gefunden werden, wie beispielsweise Plant Simulation oder Arena (u.a. (Siderska, 2016)). Allen Implementierungen liegen die oben genannten Basisbestandteile zugrunde.

Im Vergleich zu kontinuierlichen Modellierungswerkzeugen beschreiben Karnon et al. (2012) die hohe Einsatzflexibilität von ereignisdiskreten Simulationswerkzeugen als einen wesentlichen Vorteil dieser Modellart. Durch diese Flexibilität sehen sie vielfältige Einsatzmöglichkeiten zur Modellierung und Analyse (Karnon et al., 2012). Auch Robinson (2005) sieht für ereignisdiskrete Simulationsmodelle ein breites Einsatzspektrum in den Bereichen: Scheduling, Validieren von Steuerungslogiken und Vorhersage zukünftiger Systemleistungsfähigkeit (Robinson, 2005). Für den Bereich der Produktionslogistik differenzieren März et al. (2011) Einsatzfelder einerseits nach der zeitlichen Orientierung und andererseits nach der Änderungsdynamik der betrachteten Problemstellung. Die folgende Abbildung 8 zeigt diese Differenzierung. Sie beschreibt zwei wesentliche Stoßrichtungen für die Nutzung ereignisdiskreter Simulationen im produktionslogistischen Kontext: die Erhöhung der Planungsgenauigkeit und die Erhöhung der Planungssicherheit. Zwar fokussiert die

Abbildung 8 auf die Produktionslogistik, dennoch sind die beschriebenen Grundstoßrichtungen auch auf andere Bereiche der Logistik übertragbar. So beschreibt Kühn (2006) vergleichbare Simulationsfragestellungen für die Logistik im Allgemeinen (Kühn, 2006).



**Abbildung 8: Einsatzfelder der ereignisdiskreten Simulation (März und Weigert, 2011)**

Die folgende Tabelle 1 fasst diese Fragestellungen zusammen. Im Bereich der Produktionslogistik wird die ereignisdiskrete Simulation systematisch in allen klassischen Teilbereichen der Produktionsplanung und -steuerung verwendet (Semini et al., 2006; Jahangirian et al., 2010; Jeon und Kim, 2016). Dies wird auch bei näherer Betrachtung der Literatur in diesem Bereich deutlich (Reggelin et al., 2017).

**Tabelle 1: Simulationsgegenstände in der Logistik in Anlehnung an (Kühn, 2006)**

Themengebiet	Beispiele
Planung	Absicherung der Planung durch das Sammeln von Erfahrungen an dem noch nicht realisierten System
	Rechtzeitige Korrektur von Planungsfehlern
	Dimensionierung von Anlagen (z.B. durch Optimierung von Puffer- oder Lagergrößen)
	Einsparung oder Vereinfachung von Systemelementen (z.B. bei Überdimensionierung)
	Sensitivitätsanalysen zur Generierung von Aussagen der Systemreaktion auf Schwankungen von Eingabewerten und Parametern
	Überprüfung von Pflichten- und Lastenheft
Realisierung und Ablauf	Bestimmen von Notfallstrategien beim Ausfall einzelner Anlagenkomponenten
	Darstellung der Funktionalität und der Zusammenhänge
	Ineinergreifendes Entwickeln und Testen von Steuerungssoftware
	Mitarbeiterschulungen am simulierten System
Betrieb	Vorausschauende Untersuchung von Strategien, zwischen denen kurzfristig gewechselt werden kann
	Überprüfung der Einplanung der Aufträge auf die verfügbaren Anlagen
	Ableiten von Reaktionsalternativen für Störfälle

---

So beschreiben Turner et al. (2016) den Einsatz ereignisdiskreter Modelle in dem Bereich Fabrikplanung (Turner et al., 2016) oder Gyulai et al. (2016) im Bereich der Planung von rekonfigurierbaren Produktionssystemen (Gyulai et al., 2016), um exemplarisch nur wenige der zahlreichen Einsatzszenarien aufzuzeigen. Das ereignisdiskrete Modelle in vielen Bereichen der Logistik als Analysewerkzeuge zum Stand der Technik zählen, wird durch die Existenz von branchenspezifischen Bausteinkästen für verschiedene Anwendungsbereiche, wie beispielsweise der Automobilproduktion, durch den Methodenbaukasten des VDA, deutlich (Mayer und Pöge, 2010).

Neben dem Bereich der Produktionslogistik sind ereignisdiskrete Simulationsansätze auch in anderen Feldern der Logistik inzwischen fest verankert. So wird auch in der Hafenlogistik sowie für globale maritime Logistikketten die ereignisdiskrete Simulation häufig für Analysen eingesetzt (Dragović et al., 2017). Ohne dem Kapitel 2.5, in dem systematisch die Planungsaufgaben in der Hafenlogistik aufgezeigt werden, vorweg greifen zu wollen, sei an dieser Stelle dennoch exemplarisch auf den Einsatz von ereignisdiskreten Simulationsmodellen für die Hafenlogistik verwiesen, um die praxeologische Relevanz der Simulationsnutzung im Kernthemenfeld dieser Arbeit zu untermauern:

- RoRo-Hafen (Iannone et al., 2016; Muravev et al., 2016): Nutzung von ereignisdiskreter Simulation für die dedizierte Untersuchung von operativen Planungsentscheidungen für RoRo-Terminals.
- Containerterminals: Eine Vielzahl von simulativen Untersuchungen zu Prozessen auf Containerterminals kann in der Literatur gefunden werden. Dragovic et al. (2017) zeigen hierbei, anhand einer umfangreichen Literaturanalyse, dass ereignisdiskrete Simulationsmodelle hierbei einen weitverbreiteten Einsatz, unter anderem in der Analyse von Yardaufstellungen, Liegeplatzzuweisung oder Prioritätsregeln für Portalhubwagen (Straddle-Carrier) finden (Dragović et al., 2017).
- Kran- und Durchführungsplanung: Auch für feingranulare Aufgabenstellungen, wie beispielsweise die Planung und Durchführung von Kranoperationen werden ereignisdiskrete Modelle eingesetzt (Bruzzone et al., 2011)
- Taktische Planung auf Containerterminals: Trotz der bereits beschriebenen üblichen Ausrichtung auf operative Problemstellungen, werden ereignisdiskrete Simulationen auf für langfristige strategische Fragestellungen im Kontext von Containerterminals verwendet (Carteni und Luca, 2012)
- Liegeplatzplanung: Die Liegeplatzplanung ist ein klassisches operatives Planungsproblem, welches die Allokationsentscheidung von Schiffen zu definierten Liegeplätzen vornimmt. Auch dieses Feld ist ein Anwendungsbereich für ereignisdiskrete Simulationen (z.B.: (Legato und Mazza, 2001))

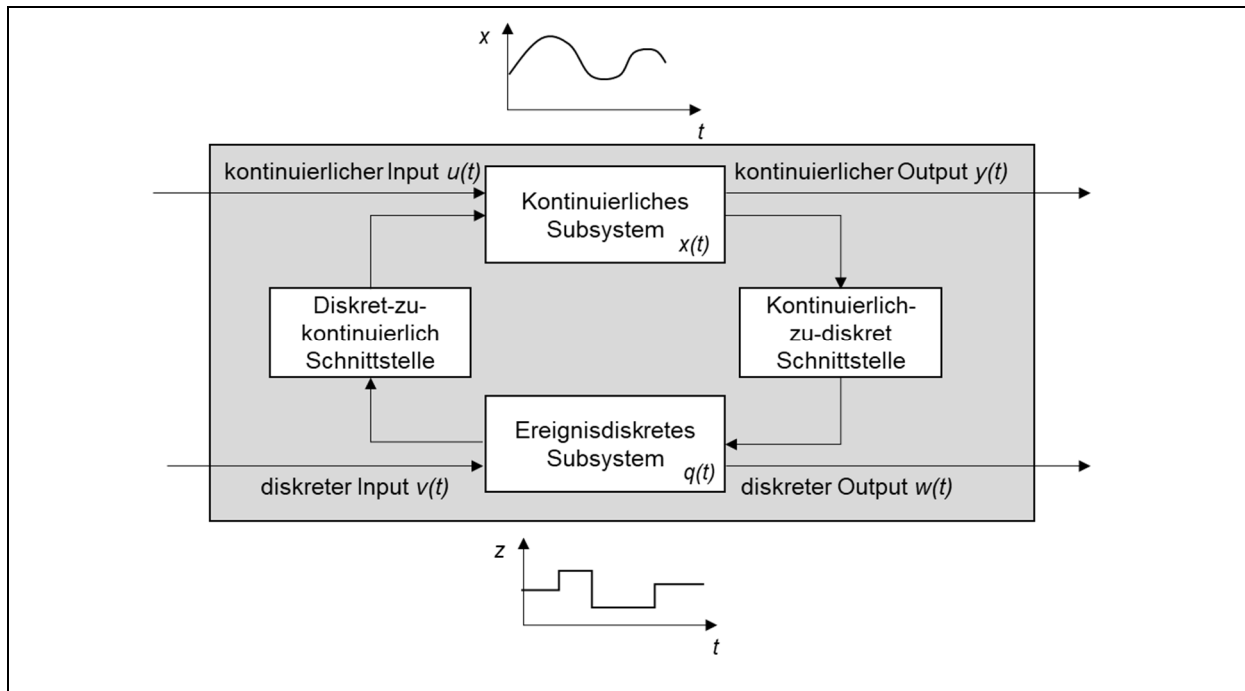
---

Diese beispielhaften Eindrücke untermauern die Bedeutung der Anwendung von ereignisdiskreten Simulationsmodellen in der Hafenlogistik. Dragovic et al. 2017 analysieren im Rahmen einer Literaturrecherche die Anwendungsbreite von verschiedenen Analysewerkzeugen und kommen zu dem Schluss, dass ereignisdiskrete Simulationsmodelle eines der wichtigsten Werkzeuge für die Untersuchung von hafenbezogenen Fragestellungen sind (Dragović et al., 2017).

### 2.3.3 Hybride Simulation

Hybride Modelle stellen eine Mischform hinsichtlich ihres Zeitverhaltens dar. Dieser Sachverhalt kann bereits aus dem Begriff „hybrid“ etymologisch abgeleitet werden, in dem „Hybride“ als Kreuzungen von mehreren Objekten und deren Eigenschaften verstanden werden. Folglich beinhalten hybride Simulationsmodelle sowohl kontinuierliches als auch ereignisdiskretes Verhalten. Konzeptionell zielen Sie darauf ab, dem Modellierer die Vorteile aus beiden Modellierungswelten zugänglich zu machen. Allerdings wird der Begriff der hybriden Simulation in der Literatur häufig unterschiedlich definiert und bezieht sich teilweise auf verschiedene kombinierte Eigenschaften oder Aspekte. Mustafee et al. (2017) versuchen daher eine möglichst umfassende Definition zu geben, indem sie ein Klassifikationssystem mit vier unterschiedlichen Grundtypen vorschlagen (Mustafee et al., 2017). Um eine weite Definition zu ermöglichen, fokussieren Mustafee et al. (2017) nicht ausschließlich auf die Simulationsmechanik, sondern beziehen die zugrundeliegenden Modellierungsparadigmen, die Methodik und die technische Ebene mit ein.

Im Rahmen des praktischen Ziels dieser Arbeit sollen die verwendeten Werkzeuge gegeneinander abgegrenzt und die Auswahl der verwendeten Werkzeuge im Rahmen des Problemlösungszyklus herausgearbeitet werden. Daher scheint zunächst die weitgefaste Definition von Mustafee hilfreich, den Begriff hybride Simulation einzuordnen. So können verschiedene Ausprägungen, wie beispielsweise die kombinierte Nutzung von Methoden des Operation-Research (z.B. Liegeplatzplanung) und Simulationstechniken (z.B. Ablaufsimulation auf dem Autoterminal) in einem hybriden Modell vorkommen. Um jedoch eine klare Abgrenzung im Rahmen des praktischen Ziels der Arbeit zu gewährleisten, wird für diese Arbeit bewusst eine engere Definition von hybrider Simulation gewählt, indem vornehmlich auf die technische Ebene fokussiert wird (Brailsford et al., 2019). In diesem Zusammenhang wird eine hybride Simulation als eine Simulation mit sowohl diskretem als auch einem kontinuierlichen Zeitverhalten verstanden. Das kontinuierliche Teilmodell beschreibt die kontinuierliche Veränderung von Zustandsgrößen, während das diskrete Teilmodell sprunghaft Umschaltvorgänge beschreibt und steuert. Die Abbildung 9 zeigt das grundsätzliche Zusammenspiel der kontinuierlichen und diskreten Bestandteile in hybriden Systemen.

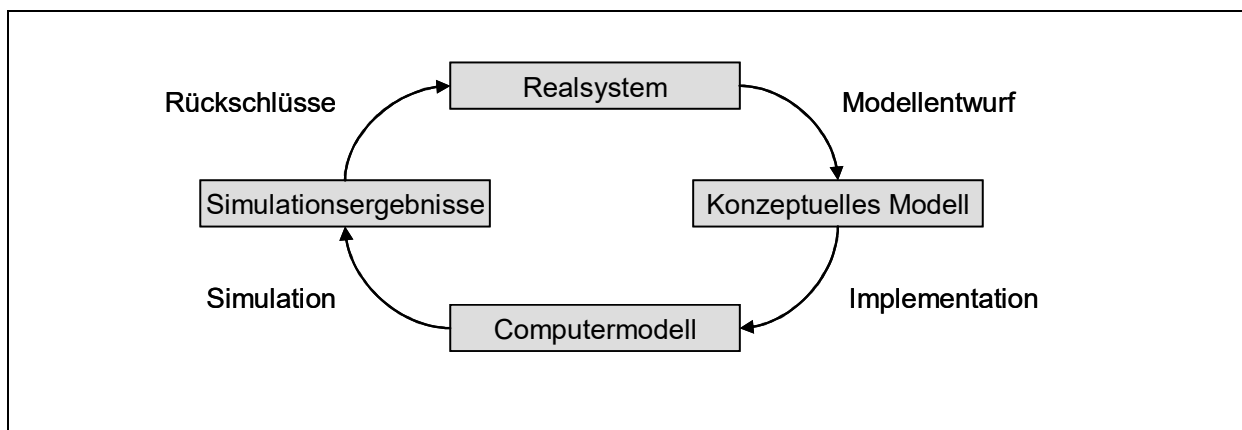


**Abbildung 9: Struktur hybrider Systeme nach (Lunze und Lamnabhi-Lagarrigue, 2009)**

Dieses Zusammenwirken von diskreten und kontinuierlichen Teilmodellen ist ein Kernmerkmal von hybriden Systemen (Lunze und Lamnabhi-Lagarrigue, 2009). Folglich müssen hybride Simulationstools eine Umwandlung zwischen den diskreten und den kontinuierlichen Teilsystemen ermöglichen. Die dargestellten Schnittstellen zwischen den Teilsystemen dienen der entsprechenden Umwandlung. Aus technischer Perspektive sieht Helal in der diskreten digitalen Steuerung der kontinuierlichen Teilmodelle und die Bindung dieser Teilmodelle an diskrete Ereignisse eine Funktionsvoraussetzung für hybride Simulationswerkzeuge. Hierbei dominieren die diskreten Teilsysteme das Gesamtverhalten einerseits durch das Vorkommen von stochastischen Ereignissen, sowie durch die Bindung der kontinuierlichen Teilsysteme an Ereignisse (beispielsweise durch das Auslösen von Ereignissen beim Erreichen von vordefinierten Grenzwerten in kontinuierlichen Teilsystemen) (Helal, 2008). Kommerzielle Simulationsprodukte haben diesen theoretischen Ansatz bereits aufgenommen und bieten Bibliotheken für eine kombinierte Nutzung von kontinuierlichen und ereignisdiskreten Teilsystemen an (Bangsow, 2016). In der Literatur ist ein zunehmender Einsatz von hybriden Simulationsmodellen zu erkennen. Dennoch werden aktuell häufiger reine kontinuierliche oder ereignisdiskrete Modelle verwendet (Brailsford et al., 2019). Hierbei haben hybride Simulationsansätze insbesondere für transdisziplinäre Fragestellungen besonders Einsatzpotenzial (Tolk et al., 2021).

### 2.3.4 Durchführung von Simulationsstudien

Durch ein Simulationsmodell soll ein reales System modellhaft abgebildet und zum Erkenntnisgewinn verwendet werden (VDI, 2014). Hierfür muss zunächst das reale System in ein geeignetes Computermodell überführt werden. Die Abbildung 10 zeigt ein zyklisches Vorgehen für die Erstellung eines solchen Simulationsmodells. Nach der Abgrenzung des Modellgegenstands wird zunächst ein konzeptuelles Modell im Rahmen eines Modellentwurfs vorgenommen (Banks, 2005). In der Regel bezieht sich das Betrachtungsobjekt auf ein real existierendes System. Der Betrachtungsgegenstand kann sich allerdings auch auf ein konzeptionelles System beziehen (z.B. green-field Planungen). In diesem ersten Schritt wird, wie unter 2.2 beschrieben, eine Abstraktion des realen Systems vorgenommen (VDI, 2014).



**Abbildung 10: Zyklisches Vorgehen für die Simulationsmodellierung nach (Page, 1991)**

Dieser Schritt dient der Komplexitätsverringerung des realen Systems. Zudem werden in diesem Schritt alle später benötigten Daten gesammelt und für das Computermodell geeignet aufbereitet, damit das spätere Modell in den ausgewählten Bereichen ein ähnliches Verhalten aufweist wie das zu betrachtende System (Wenzel, 2018).

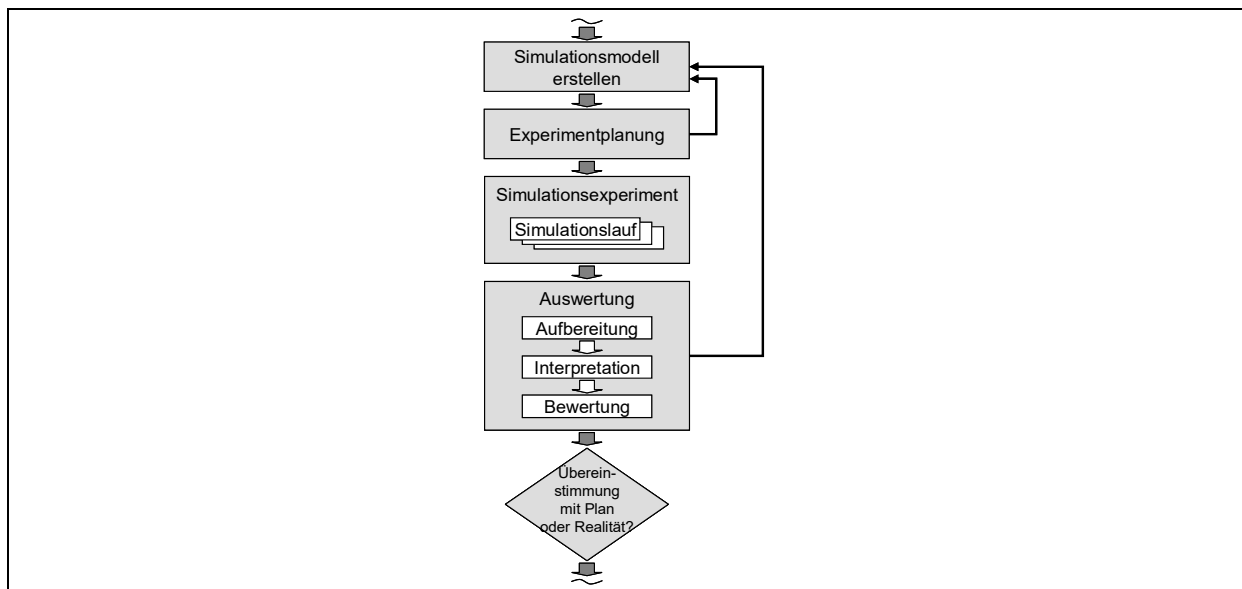
Nach der Erstellung des konzeptionellen Modells erfolgt die Implementierung in das ausführbare Computermodell, welches nach seiner Erstellung in einem weiteren Schritt verifiziert und validiert wird (Rabe et al., 2008). Die Auswahl und die Qualität der Inputdaten sind für eine anschließende Modellverifikation und -validierung ebenso von besonderer Bedeutung, wie die gewählten zu analysierenden Outputdaten (VDI, 2014). Der Vorgang der Validierung dient der Überprüfung der Abbildungsgenauigkeit zwischen dem Modell und der Realität (Rabe et al., 2008). Hierbei wird im Zuge der Verifikation jedoch zunächst überprüft, ob das Modell technisch richtig funktioniert. In der darauf aufbauenden Validierung wird hingegen geprüft, ob der Modelloutput für das System plausibel ist. Die folgende Tabelle 2 zeigt mögliche Techniken zur Modellverifikation und -validierung auf. In der Regel werden bei der Durchführung von Simulationsstudien nicht nur eine Verifikations- und eine

Validierungsmethode angewendet, sondern die Modelle werden mit mehreren dieser Verfahren parallel überprüft (Kleijnen, 1995). Ein allgemeingültiges Vorgehen für die Verifikation und Validierung existiert nicht. Dieser Schritt ist für jedes Modell individuell zu planen und sollte möglichst viele Input- und Outputparameter umfassen (Sargent, 2013).

**Tabelle 2: Validierung von Simulationsmodellen in Anlehnung an (Eley, 2012)**

<b>Technik</b>	<b>Kurze Beschreibung</b>
Animation	Grafische 2D oder 3D-Darstellung der Abläufe. Die Plausibilität der Abläufe wird durch Beobachtung und Vergleich zum realen System durchgeführt
Begutachtung	Begutachtung durch Management oder Auftraggeber dient der Überprüfung der Ziele der Studie mit den vereinbarten Zielen und Rahmenbedingungen
Dimensionstest	Aufdecken von konzeptionellen Fehlern oder Fehlern bei der Entwicklung von Formeln durch Nachberechnung der Formeln und Überprüfen der Formeldimensionen
Ergebnisvaliditätstest	Vergleich des Auftretens von Ergebnissen im Simulationsmodell mit der Realität (z.B. Anzahl Aufträge je Schicht)
Festwerttest	Ersetzen von stochastischen Größen durch feste Werte (z.B. Bearbeitungszeiten bei Maschinen). Hierdurch kann der Systeminput leichter überschlagen und mit dem Simulationsoutput zur Plausibilisierung verglichen werden
Grenzwertest	Eingabewerte (Parameter) werden so gesetzt, dass das Modellverhalten besser vorhersagbar wird (z.B. Nutzung kleinster Losgrößen und kürzester Bearbeitungszeiten)
Monitoring	Werte von Zustandsgrößen und Variablen (z.B. Auslastung oder Durchlaufzeit) werden während des Simulationslaufs aufgezeigt und überprüft
Schreibtischtest	Sorgfältige Überprüfung der eigenen Arbeit in Bezug auf Vollständigkeit, Korrektheit, Konsistenz und Eindeutigkeit durch die Erstellung einer Dokumentation
Sensitivitätsanalyse	Eingabewerte des Modells werden verändert und die Auswirkungen auf die Ausgabewerte bestimmt. Die Richtung der Auswirkung muss mit der Realität übereinstimmen
Strukturiertes Durchgehen	Die Projektbeteiligten gehen jede Programmanweisung schrittweise durch (Debugger), bis jeder von der Richtigkeit der Anweisungen überzeugt sind.
Test der internen Validität	Mit unterschiedlichen Startwerten der Zufallsgeneratoren werden bei gleichbleibenden Eingabewerten Simulationsläufe durchgeführt.
Trace-Analyse	Es wird das Verhalten einzelner Objekte im ausführbaren Modell verfolgt und das logische Verhalten und die Plausibilität überprüft.
Turing-Test	Experten, die das System kennen, werden verschiedene Simulationsausgaben und Beobachtungen des realen Systems vorgelegt.
Ursache-Wirkungs-Graph	Die verschiedenen Ursachen und Wirkungen werden in einem Graphen dargestellt, der die logischen Beziehungen verdeutlicht.
Validierung im Dialog	Das Modell wird gemeinsam mit Fachexperten, die Kenntnisse über das reale System besitzen, diskutiert
Validierung von Vorhersagen	Das Modell wird zunächst genutzt, um eine Vorhersage zu treffen. Anschließend wird die Richtigkeit dieser Vorhersage am realen System überprüft.
Vergleich mit anderen Modellen	Die Ergebnisse des Modells für bestimmte Eingabewerte werden mit Ergebnissen eines anderen, i. d. R. einfacheren Modell bei gleichen Eingabewerten verglichen
Vergleich mit aufgezeichneten Daten	Ein- und Ausgabewerte eines real existierenden Systems, welche in der Vergangenheit aufgezeichnet wurden, werden zum Test verwendet.

Erst nach der erfolgreichen Verifikation und Validierung des Simulationsmodells wird eine sorgfältige Planung der Simulationsexperimente vorgenommen. Die Experimentplanung ist notwendig, da mittels eines Simulationsmodells viele denkbare Varianten geprüft werden können. Daher ist im Rahmen der Experimentplanung festzulegen, welche Einflussgrößen und Wechselwirkungen für den gewählten Untersuchungssachverhalt relevant sind (VDI, 2014). Die Abbildung 11 zeigt einen systematischen Ablauf für die Planung und Durchführung geeigneter Experimente. Der Prozess der Modellerstellung (Abbildung 10) kann in dem Ablauf, der in Abbildung 11 dargestellt ist, als Startpunkt gesehen werden.



**Abbildung 11: Experimentplanung und -auswertung (VDI, 2014)**

Je nach Umfang und Art der gewünschten Analysen kann die Experimentplanung unterschiedlich gestaltet sein. Ziel ist die Definition von verschiedenen Simulationsläufen, welche in geeigneter Form die relevanten Modellparameter verändern und zu einer Aussage im Sinne der Ausgangsfragestellung der Simulationsstudie ermöglichen (Cox und Reid, 2000). Ein einfacher und sehr intuitiver Ansatz ist die sogenannte OFAT-Methode (one factor at a time), bei der pro Simulationslauf jeweils nur ein Parameter verändert wird. Da der Parameterraum lediglich eindimensional durchlaufen wird, können OFAT-Ansätze insbesondere bei komplexen Systemen mit vielen Parametern zu falschen Rückschlüssen der Parameterwirkungen führen (Czitrom, 1999). Dieses methodische Defizit können strukturierte Versuchspläne lösen. So bildet ein vollfaktorieller Versuchsplan alle Kombinationsmöglichkeiten der zu untersuchenden Parameter ab. Nach dem Durchlaufen aller vordefinierten Simulationsexperimente können die Parametereffekte und Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Parametern mittels statistischer Methoden genau analysiert werden. Hierfür werden in einem sogenannten  $2^k$  Design einer vollfaktoriellen Analyse für jeden Faktor (Parameter) zwei Faktorausprägungen (hoch und niedrig) gewählt.



---

Die Auswahl der hohen und niedrigen Werte übernimmt der Modellierer auf der Grundlage seiner Systemkenntnis. Durch die Abbildung der jeweiligen Faktorwerte mittels zwei Ausprägungen resultieren  $2^k$  verschiedene Kombinationsmöglichkeiten (Simulationsläufe) für  $k$  Faktoren. Die Analyse der Faktorwirkungen auf die definierten KPIs und die Wechselwirkungen der Faktoren untereinander kann durch verschiedene Werkzeuge und Diagramme erfolgen (Durakovic, 2017; Gutenschwager et al., 2017). Hierbei sind insbesondere die vergleichenden Diagramme für die Haupt- und Nebeneffekte von zentraler Bedeutung (Durakovic, 2017). Guthrie et al. 2020 beschreiben ein dediziertes Vorgehen für die Durchführung einer vollfaktoriellen Analyse. Nach einer visuellen Analyse der Daten mittels Histogrammen, Box-Plots, QQ-Plots und Streudiagrammen wird empfohlen, ein entsprechendes Datenmodell der Abhängigkeiten zu formulieren und mittels eines ANOVA-Verfahrens (Varianzanalyse) anzunähern. Um irrelevante Faktorwirkungen aus dem Modell zu entfernen, werden in einem Nachfolgeschritt die potenziellen Faktorkombinationen reduziert und die Güte des angepassten Modells geprüft. Auf der Grundlage des angepassten Modells können dann die Haupt- und Nebeneffekte berechnet und visualisiert werden (Guthrie, 2020). Zwar können durch einen solchen vollfaktoriellen Plan systematisch sämtliche Kombinationen untersucht werden, allerdings ist eine solche Versuchsplanung aufgrund der kombinatorischen Vielfalt oftmals sehr umfangreich und rechenintensiv (Law, 2017). Wegen der schnell wachsenden Anzahl von Parameterkombinationen bei steigender Anzahl von Faktoren sind vollfaktorielle Versuchspläne besonders für Untersuchungen mit vergleichsweise wenigen Faktoren geeignet (Cox und Reid, 2000).

Um die Rechenintensität zu reduzieren, wurden weitere Konzepte für die Versuchsplanung entwickelt. Teilfaktorielle Versuchspläne versuchen die beschriebene kombinatorische Komplexität zu reduzieren, indem mögliche Wechselwirkungen höherer Ordnung zwischen den Parametern zugunsten einer Verringerung der Kombinationsmöglichkeiten vernachlässigt werden (Cox und Reid, 2000). Für diesen Schritt sind allerdings bereits Kenntnisse oder gesicherte Erwartungen zu dem betrachteten System notwendig (Jankovic et al., 2021). Vernachlässigte Faktorbeziehungen können nach dem durchgeführten Versuchsplan nicht wieder hergestellt werden. Somit sind teilfaktorielle Versuchspläne nicht für ein vollständiges Faktor-Screening bei noch unbekanntem Wechselwirkungen der Faktoren untereinander einsetzbar.

Auch Ansätze wie die Taguchi-Methode zielen auf die Reduktion von rechnerischer Komplexität, indem ein additives Ursache-Wirkungs-Modell unterstellt wird und die Faktoren in Steuergrößen und Störgrößen unterteilt werden (Krishnaiah und Shahabudeen, 2012). In der Versuchsplanung werden teilfaktorielle Versuchspläne der Steuer- und Störgrößen durchlaufen und entsprechende Rückschlüsse auf die Wechselwirkungen ermöglicht.

---

Im Vergleich der Versuchsplanungsmethoden untereinander ist festzuhalten, dass die vollfaktorielle Versuchsplanung, trotz des erhöhten Rechenaufkommens, insbesondere bei völlig unbekanntem Wechselwirkungen und einem gewünschten vollständigen Faktorscreening, die höchste Genauigkeit besitzt. (Law, 2013; Jankovic et al., 2021).

Ein weiterer wichtiger Aspekt der Versuchsplanung ist unabhängig von dem Experimentdesign zu betrachten und zu definieren. Neben der reinen Versuchsanordnung muss vor der Durchführung einer Simulationsstudie die Replikationshäufigkeit der einzelnen Simulationsläufe geplant werden, sofern das Modell nicht vollständig deterministisch ist. Enthält das Modell stochastische Größen, so sind Simulationsläufe mit gleichen Parametern zu wiederholen, bis sich die Streubreite des Simulationsoutputs in einem statistisch gesichteten Bereich bewegt. In der Regel werden hierfür vor den Simulationsläufen ein entsprechendes Signifikanzniveau festgelegt und entsprechende Replikationen des Simulationslaufes vorgenommen, bis die beobachteten Mittelwerte des Simulationsoutputs nicht mehr außerhalb dieses Konfidenzintervalls liegen (Banks, 2005).

Erst nachdem ein geeignetes Versuchsdesign gewählt wurde, können die benötigten Simulationsläufe mit ihren Parametern definiert werden. Diese Experimente werden anschließend mittels des verifizierten und validierten Simulationsmodells durchlaufen (Wenzel, 2018). Um Rückschlüsse auf das Systemverhalten zu generieren, werden in einem Simulationsexperiment mehrere Simulationsdurchläufe mit definierten Parametervariationen durchgeführt und die Ergebnisse dokumentiert (VDI, 2014).

## **2.4 Automobilterminals als logistisches System**

Automobilterminals als spezielle Form von Seehäfen sind der zentrale Betrachtungsgegenstand dieser Arbeit, sie sind integrale Knotenpunkte in der globalen Fertigfahrzeugdistribution und stehen somit in wechselseitiger Abhängigkeit zu den übrigen Akteuren der weltweiten Lieferketten. Gemäß der unter 2.1 vorgestellten Mirko-Logik und des damit verbundenen deskriptiven Ziels soll dieser Betrachtungsgegenstand klar abgegrenzt und als logistisches System eingeordnet werden. Um eine fundierte Einordnung zu ermöglichen, wird zunächst der Logistikbegriff aufgenommen und ein für diese Arbeit zugrundeliegendes Logistikverständnis formuliert. Hierauf aufbauend wird der Hafenbegriff differenziert und seine Eigenschaft als Logistiksystem im Sinne des deskriptiven Ziels festgehalten.

### **2.4.1 Logistik**

In der Literatur existiert eine Vielzahl von verschiedenen Logistikdefinitionen, welche oftmals auf vergleichbare Definitionselemente und Inhalte zurückgreifen. Fleischmann beschreibt

---

diese Elemente als: logistische Prozesse, logistische Objekte und logistische Systeme (Fleischmann, 2008). Schon bei dieser zusammenfassenden definitorischen Betrachtung wird die Bedeutung des Systembegriffs für die Logistik deutlich. Auch Delfmann et al. stellen in ihrem „Positionspaper zum Grundverständnis der Logistik als wissenschaftliche Disziplin“ einen starken Bezug zu sozio-technischen Systemen her, indem sie durch die folgenden fünf Eckpunkte zentrale Merkmale der Logistik als Wissenschaftsdisziplin zusammenfassen (Delfmann et al., 2011):

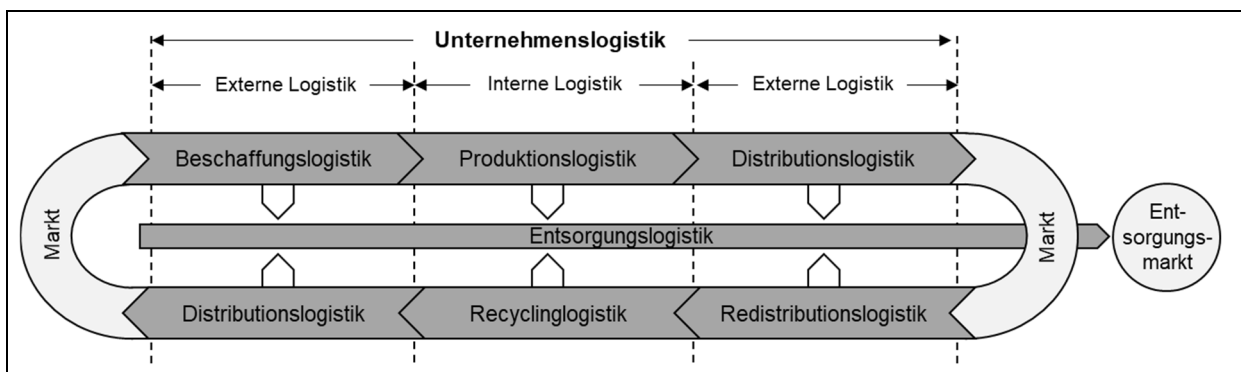
- Erkenntnisobjekt der Logistik sind Flüsse in Netzwerken
- Logistische Aggregationsgrade und Selbstähnlichkeit des Netzwerkmodells
- Interdisziplinarität der Logistik
- Anwendungsorientierung der Logistikwissenschaft
- Bezug des Begriffs-, Theorie- und Methodenzugangs zum Netzwerkmodell

Die hiermit verbundene Sichtweise auf logistische Vorgänge als Fluss von Gütern und Informationen in einem Netzwerk, mit dem Ziel, ihn einheitlich zu beschreiben und ihn im Sinne eines übergeordneten Zielsystems zu gestalten und zu steuern, entspricht nach Gudehus den Grundaufgaben der Logistik (Gudehus, 2010). Ebendiese Grundaufgaben setzt Pfohl umfassend in einer fluss- und netzwerkorientierten Logistikdefinition zusammen:

„Zur Logistik gehören alle Tätigkeiten, durch die raumzeitliche Gütertransformationen und damit zusammenhängenden Transformationen hinsichtlich der Gütermengen und Sorten, der Güterhandhabungseigenschaften sowie der logistischen Determiniertheit der Güter geplant, gesteuert, realisiert oder kontrolliert werden. Durch das Zusammenwirken dieser Tätigkeiten soll ein Güterfluss in Gang gesetzt werden, der einen Lieferpunkt mit einem Empfangspunkt möglichst effizient verbindet.“ (Pfohl, 2010)

Die angesprochenen raumzeitlichen Gütertransformationen beziehen sich nicht nur auf den Fluss von Gütern durch ein Netzwerk, sondern schließen auch die Lagerung als Bestandteil des Güterflusses (rein zeitliche Transformation ohne Ortsveränderung) ein. Insbesondere im Hinblick auf die Rolle von Seehäfen in den weltweiten automobilen Logistikketten ist dieser zeitliche Gütertransformationsprozess nicht unerheblich. In diesem Zusammenhang ist auch das Merkmal des Aggregationsgrads und der Selbstähnlichkeit des Netzwerkmodells für diese Arbeit relevant, indem logistische Problemstellungen für Netzwerke auf unterschiedliche Aggregationsebenen bezogen werden können. Delfmann et al. unterscheiden zwischen einer Mikro-, einer Meso- und einer Makroebene. Auf der Mikro-Ebene stehen einzelne Wirtschaftsobjekte im Fokus (z.B. Produktionsprozesse oder innerbetriebliche Transporte),

während auf der Meso-Ebene verbundene wirtschaftliche Einheiten, beispielsweise in Form von Produktions- und Wertschöpfungsnetzwerken, adressiert werden. Im Gegensatz hierzu bezieht sich die Makroebene auf volkswirtschaftliche Gesamtzusammenhänge (Gudehus, 2010; Pfohl, 2010). Im Zuge dieser Arbeit sind Automobilterminals sowohl auf der Mikro-Ebene, mit ihrem internen Systemverhalten und die Wechselwirkungen zwischen den Systemelementen, als auch auf der Meso-Ebene durch ihre Einbettung in die internationalen automobilen Wertschöpfungsketten zu betrachten. Die logistischen Aufgaben auf der Mikro-Ebene, der Unternehmenslogistik, differenziert Wiendahl, indem er die einzelnen Phasen des Güterflusses durch das Unternehmen beschreibt. Die folgende Abbildung 12 zeigt die Spannweite der Unternehmenslogistik.



**Abbildung 12: Unternehmenslogistik nach Phasen des Güterflusses (Wiendahl, 2009)**

Ziel der Unternehmenslogistik ist die effiziente Gestaltung, Organisation und Realisation der Güterflüsse durch das Unternehmen, vom Beschaffungsmarkt bis hin zum Absatzmarkt (Gudehus, 2010; Günther und Tempelmeier, 2012). Gemäß der zugrundeliegenden Logistikdefinition stellen somit Beschaffungs- und Absatzmarkt die Start- bzw. Endpunkte dar, welche im Rahmen der Unternehmenslogistik möglichst effizient miteinander verbunden werden sollen. Die Güterströme, durch welche ein Produktionsunternehmen den Beschaffungsmarkt mit dem Absatzmarkt verbindet, werden durch die Unternehmensgrundfunktionen Beschaffung, Produktion und Distribution bestimmt. Insgesamt ist die Unternehmenslogistik als bidirektionaler Güterfluss zu sehen, welcher nicht nur in Richtung des Kunden verläuft, sondern auch die Güterflüsse nach dem Lebenszyklus von Produkten durch die Bereiche Redistributionslogistik und Recyclinglogistik einschließt (Wiendahl, 2009). Diese Güterflüsse vom Kunden in Richtung des Unternehmens werden im Rahmen des sogenannten Closed-Loop-Managements geplant und gesteuert. Jedem dieser Bereiche kann eine Teilaufgabe der Unternehmenslogistik zugeordnet werden (Sommerer, 1998; Wiendahl, 2009). Die Bereiche der klassischen Unternehmenslogistik verfolgen das Ziel, Güter vom Beschaffungsmarkt zu akquirieren und sie in angemessener Qualität, Quantität und zum gewünschten Zeitpunkt den Produktionsprozessen zur Verfügung zu stellen. Nach

---

Beendigung der Produktion sollen die produzierten Güter den Abnehmern plangemäß bereitgestellt werden. Wildemann 2008 beschreibt die klassische Unternehmenslogistik abstrakter als: „die ganzheitliche, Funktions- und Unternehmensgrenzen überwindende Gestaltung, Planung, Steuerung und Koordination der Material- und Produktflüsse sowie der hierzu komplementären Informationsflüsse vom Lieferanten durch das Unternehmen bis hin zum Kunden.“ (Wildemann, 2008)

Die Differenzierung der einzelnen Phasen der Unternehmenslogistik kommt nicht nur bei der Analyse auf der Mikroebene zum Tragen, sondern auch bei der netzwerkfokussierten Betrachtung der logistischen Meso-Ebene, bei denen unterschiedliche Akteure einer Logistikkette über diese Einzelfunktionen (z.B. Beschaffung- oder Distributionslogistik) miteinander verbunden sind. Im Kontext moderner, global vernetzter Produktions- und Distributionsstrukturen sind diese Betrachtungsgegenstände nicht zwingend auf die Produktionsprozesse einzelner Standorte zu begrenzen, sondern umfassen auch die standortübergreifende Produktion und Distribution in vernetzten Strukturen (Wiendahl und Lutz, 2002). Derartige Produktionsnetzwerke zielen darauf, die global verteilte Nachfrage auf den Märkten zu bedienen und hierbei durch verteilte Kostenallokationen und Durchführungskompetenzen zu höheren Skalenerträgen sowie einer ausgeprägteren Flexibilität gegenüber hochintegrierten, lokalen Fertigungsstrukturen zu realisieren. Die entsprechende Verteilung von Produktionsaufgaben in einem globalen Netzwerk bedingt eine deutlich stärkere Rolle von Informations- und Kommunikationstechnologien in Planung und Steuerung der Güterströme und andererseits die Berücksichtigung der Entscheidungen von menschlichen Akteuren als weiteres zu koordinierendes Element (Dekkers, 2009; Frazzon et al., 2013). Durch die gesteigerte planerische Komplexität in globalen Produktionsnetzwerken werden auch zunehmend dezentrale Planungs- und Steuerungsansätze thematisiert (Behnamian und Fatemi Ghomi, 2016). Im Kontext der vernetzten und organisationsübergreifenden Logistik ist auch der Begriff des Supply-Chain-Managements (SCM) zu verorten. Die Einordnung des SCM in die Logistik kann aus unterschiedlichen Perspektiven erfolgen (Larson und Halldorsson, 2004; Halldorsson et al., 2007). Eine verbreitete Sichtweise schreibt dem SCM einen vereinenden Charakter zu, welcher vornehmlich auf der Ebene von Geschäftsprozessen auch die Logistik einschließt und unternehmensübergreifend um weitere betriebswirtschaftliche Bereiche wie beispielsweise Marketing oder Controlling anreichert (Kotzab, 2000). Im Allgemeinen können Häfen als wesentliche physische Knotenpunkte für die Warenströme innerhalb globaler Supply Chains verstanden werden, deren vertikale oder horizontale Integration in die Supply Chain als zusätzlicher Erfolgsfaktor zu sehen sind (Bichou und Gray, 2004; Talley, 2009). Die Möglichkeit zur Integration beispielsweise durch die Anpassung von Informations- und Kommunikationstechnologien sowie die Schaffung einer hohen Interoperabilität mit

---

anschließenden Hinterlandverkehren stärkt die Wettbewerbsfähigkeit von Häfen (Song und Panayides, 2008).

Diese Sichtweise auf interorganisationale global agierende Logistikketten trifft insbesondere auch auf die stark arbeitsteilige Automobilbranche zu und schließt den Betrachtungsgegenstand der Automobilterminals als integralen Bestandteil der Supply Chain mit ein. Somit sind Automobilterminals als Bestandteil von Versorgungsketten der weltweiten automobilen Wertschöpfungsketten zu betrachten (Paixao und Marlow, 2001; Dias et al., 2010; Panayides und Song, 2013).

Auch das Merkmal der Interdisziplinarität ist für diese Arbeit ein integraler Bestandteil. Die Fokussierung der Beschreibung von logistischen Fragestellungen mittels des Systembegriffs, beziehungsweise die Beschreibung als Logistiksystem erlaubt und erfordert die interdisziplinäre Herangehensweise der Systemtechnik (Bruns, 1991; Kovács und Spens, 2005; Huynh, 2013). Dies gilt speziell auch für den Bereich der Seehäfen, deren unterschiedliche Fragestellungen in der Vergangenheit durch Methoden aus verschiedenen Disziplinen adressiert wurden (Woo et al., 2011).

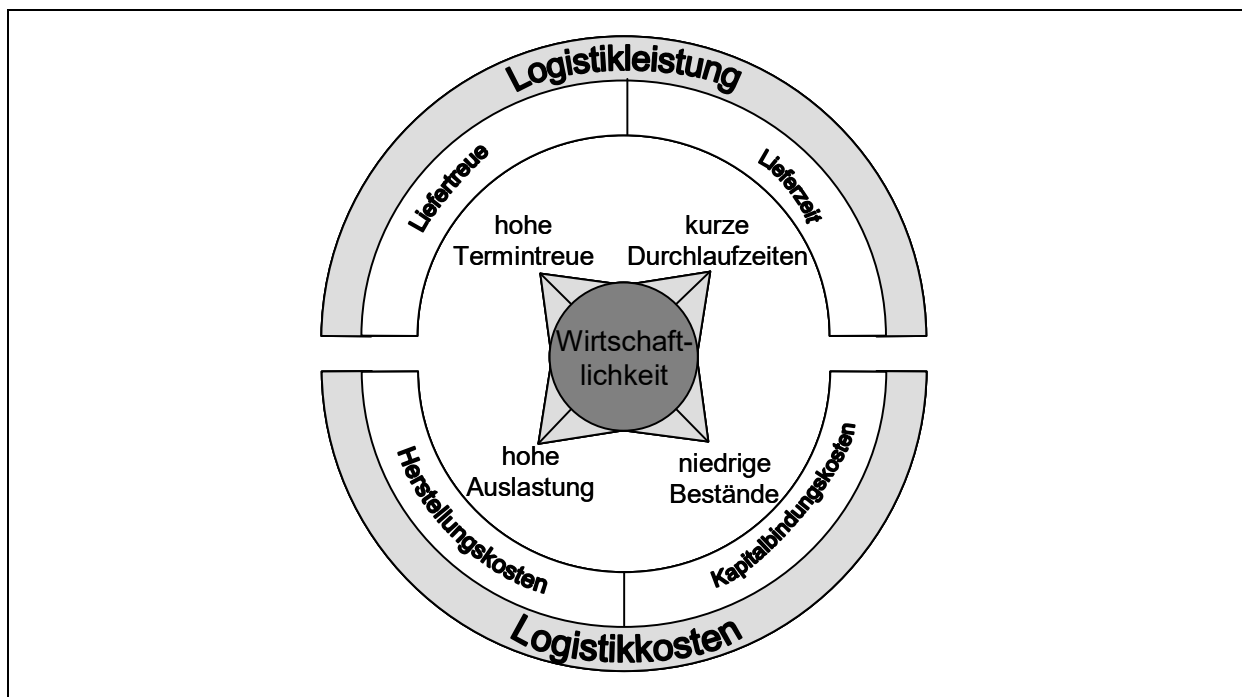
Wie von Delftmann et al. (2011) postuliert, liegt auch dieser Arbeit eine starke Anwendungsorientierung zugrunde, indem das Erkenntnisobjekt zunächst im Rahmen der deskriptiven Zielstellung verallgemeinert, klassifiziert und beschrieben werden soll, um anschließend anhand von in der Anwendung existierenden Fragestellungen ausdifferenziert und analysiert zu werden. Diese Herangehensweise berücksichtigt die Kritik von Hofmann, dass eine reine anwendungsbezogene Forschung einem gemein methodisch übertragbaren Erkenntnisgewinn entgegensteht. Sie versucht beide Aspekte miteinander zu vereinen (Hofmann, 2004).

#### 2.4.2 Zielgrößen der Logistik

Ein Kernelement der zugrundeliegenden Logistikdefinition ist die effiziente Gestaltung von raumzeitlichen Gütertransformationen. Folglich ist die Frage nach einer vergleichbaren Messung der Effizienz von logistischen Prozessen inhärent mit dem Logistikbegriff verknüpft. Für eine umfassende Analyse der logistischen Prozesse auf einem Autoterminal sowie die Untersuchung der Wirkungen von entwickelten Problemlösungsstrategien ist ein einheitliches Zielsystem unabdingbar. Gudehus (2010) stellt ein Zielsystem zwischen Logistikleistung, Logistikqualität und Logistikkosten vor (Gudehus, 2010). Zahlreiche andere Autoren (u.a. Pfohl) schlagen vergleichbare Zielsysteme vor (Pfohl, 2010). In der Regel fokussieren diese Zielsysteme auf Zielgrößen, welche teilweise starke positive, als auch negative Interdependenzen untereinander aufweisen. Eine positive Interdependenz liegt vor, wenn die

Verbesserung einer Zielgröße mit der Verbesserung einer anderen Zielgröße einhergeht. Bei einer negativen Interdependenz verursacht die Maximierung einer Zielgröße die Verschlechterung einer anderen. Sie stehen bei einer negativen Interdependenz in Konflikt zueinander. Folglich sind die definierten Zielgrößen teilweise nicht miteinander vereinbar und müssen daher getrennt betrachtet werden. Ein klassischer Zielkonflikt der Logistik besteht z. B. zwischen den Zielgrößen Durchlaufzeit und Kapazitätsauslastung. Gutenberg (1983) hat diesen Zusammenhang als „Dilemma der Ablaufplanung“ bezeichnet. Es besagt, dass bei einer hohen Auslastung nicht die kürzesten Durchlaufzeiten realisiert werden können (Gutenberg, 1983).

Die folgende Abbildung 13 zeigt das Zielsystem der Produktionslogistik nach Wiendahl (Wiendahl, 2009). Zwar fokussiert dieses Zielsystem auf die Produktionslogistik, es kann allerdings aufgrund der Basisdimensionen Logistikleistung und Logistikkosten auch auf die allgemeine Logistik angewandt werden. Für die weitere Betrachtung in dieser Arbeit wird dieses Zielsystem als Grundzielsystem der Logistik verstanden, aus welchem weitere problemspezifische Kennzahlen für den Terminalbetrieb abgeleitet werden können.



**Abbildung 13: Zielsystem der Produktionslogistik (Wiendahl, 2009)**

Die Logistikleistung, dargestellt im oberen Halbkreis der Abbildung 13, setzt sich aus der Liefertreue und der Lieferzeit zusammen. Die Liefertreue kann vom Markt bzw. den Kunden eines Unternehmens wahrgenommen werden. Hiermit ist die Einhaltung von vereinbarten Terminen und Mengen gemeint. Um diese einzuhalten, müssen Unternehmen innerhalb des Logistikprozesses mit einer internen, hohen Termintreue reagieren. Unter der Lieferzeit

---

hingegen ist die Zeitspanne zu verstehen, welche vom Auftragseingang bis zur Auslieferung verstreicht. Diese Zielgröße fokussiert direkt auf die effiziente, aufwandsarme Durchführung von Logistikprozessen. Um die Lieferzeit zu verkürzen, müssen Unternehmen die interne Durchlaufzeit von Prozessen reduzieren (Wiendahl, 2009). Auch bei Pfohl (2000) können diese Zielgrößen unter dem Begriff Logistikqualität gefunden werden. Er bezieht darüber hinaus die Größen, Lieferbereitschaft, Sendungsqualität, Servicegrad und Flexibilität mit in die Betrachtung ein (Pfohl, 2010).

Die Logistikkosten in der Abbildung 13 umfassen Kapitalbindungskosten und die Herstellungskosten. Kapitalbindungskosten werden durch den Aufbau von Beständen verursacht, da in diesen Beständen liquides Kapital in Form von Umlaufvermögen gebunden ist. Die daraus resultierenden Kosten können als Opportunitätskosten durch Zinsverlust angesehen werden (Gudehus, 2010). Des Weiteren können durch hohe Bestände zusätzliche Transport- und Handhabungskosten entstehen. Insbesondere dieser Effekt kann deutlich in Lagerhaltungssystemen (zu denen im weiteren Sinne auch Automobilterminals zu zählen sind) erkannt werden. Daher ist die unternehmerisch relevante Zielgröße das Halten von möglichst niedrigen Beständen (Wiendahl, 2009). Interessanterweise können Häfen, als Bestandteil von globalen Supply Chains jedoch üblicherweise keinen direkten Einfluss auf die Bestände nehmen. Diese ergeben sich aus dem übergreifenden zeitlichen Güterzu- und Abfluss und werden durch die Hersteller als fokale Unternehmen der Supply Chains maßgeblich bestimmt.

Durch mangelnde Auslastung oder Stillstand von Prozessressourcen (z.B. Personal oder Lagerflächen) entstehen für Unternehmen weitere Kosten. Aus kostenrechnerischer Perspektive soll durch die hohe Auslastung eine Fixkostendegression realisiert werden. Bei hoher Auslastung wird der Output einer Produktionseinheit erhöht, somit kann diese Einheit einen höheren Ertrag zur Deckung der Fixkosten generieren. Daher ist eine hohe Auslastung der vorhandenen Produktionskapazitäten anzustreben (Gudehus, 2010).

Basierend auf diesem Grundzielsystem können für verschiedene logistische Fragestellungen entsprechende Kennzahlensysteme abgeleitet werden. Auch für die Planung und den Betrieb von Automobilterminals existieren Kennzahlensysteme, welche auf diese Basisgrößen zurückgeführt werden können.

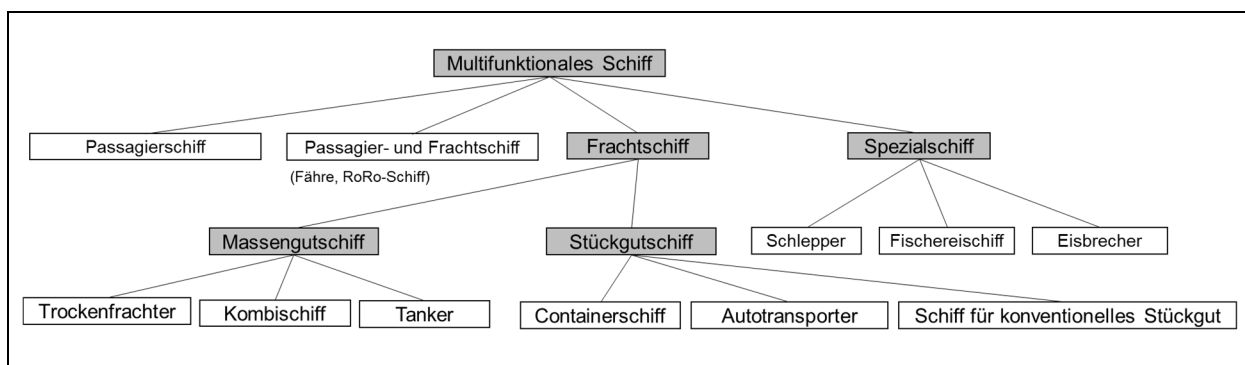
### 2.4.3 Automobilterminals als logistischer Seehafenstandort

Im Rahmen des deskriptiven Ziels dieser Arbeit sollen in diesem Kapitel zunächst die allgemeinen Begriffe Hafen und Terminal klar voneinander abgegrenzt sowie Automobilterminals als spezifische Untergruppe in den Hafenbegriff eingeordnet werden.



Anschließend werden Automobilterminals als Bestandteil globaler Wertschöpfungsketten adressiert, um die Ursachen externer Dynamik zu untersuchen.

Im allgemeinen Sprachgebrauch werden die Begriffe Hafen und Terminal häufig synonym verwendet. Grundsätzlich kann ein Hafen als ein Ort, an dem Schiffe be- und entladen werden, verstanden werden (Mayer, 2017). Dieser geografische Ort kann sowohl natürlichen Ursprungs sein (beispielsweise Buchten), als auch von Menschen künstlich angelegt worden sein. In der Regel bestehen Hafenstandorte aus unterschiedlichen Terminals für verschiedene Gütersorten (z.B. Container, Stückgüter, Massengüter). Sie dienen durch ihre Umschlagfunktion als Schnittstelle zwischen den land- und den wasserseitigen Bestandteilen der maritimen Transportketten (Talley, 2009; Huber, 2014). Durch diese Schnittstellenfunktion und die hiermit eng verbundene spezifisch benötigte Infrastruktur sind Terminals oftmals mit der abzufertigenden Schiffs- bzw. Güterart assoziiert. Die folgende Abbildung 14 zeigt eine Klassifikation von verschiedenen Schiffstypen für unterschiedliche Einsatz- und Frachtzwecke.



**Abbildung 14: Schiffstypen in Anlehnung an (Nuhn und Hesse, 2006) und (Bichou, 2009)**

Passagierschiffe nehmen zusammen mit Fährschiffen in dieser Betrachtung eine Sonderrolle ein, da sie nicht ausschließlich auf den Transport von Waren ausgelegt sind, sondern dem Personentransport dienen. Hierdurch werden weitere Sicherheitsanforderungen sowohl an die Schiffe selbst, als auch an die Hafeninfrastuktur gestellt (IMO, 1974). Ebenfalls nehmen die Spezialschiffe eine besondere Position ein. Auch Sie dienen nicht direkt dem reinen Transport von Gütern, sondern sie verrichten als Arbeitsschiffe spezielle Arbeitsaufgaben direkt im maritimen Umfeld. Unter den Spezialschiffen sind beispielsweise Schiffe für die Errichtung von Offshore-Anlagen und die zugehörige Hafeninfrastuktur zu fassen (Beinke und Görges, 2012). Die übrigen Schiffstypen hingegen sind für den reinen Gütertransport ausgelegt und sind ausschließlich durch Seefahrer bemannt. Die klassischen Frachtschiffe werden in Stückgutschiffe und Massengutschiffe unterschieden werden (Nuhn und Hesse, 2006). Stückgutschiffe sind auf den Transport nicht schüttbarer Transporteinheiten ausgelegt.

---

Hierunter fallen einerseits sämtliche Containerschiffe sowie Schiffe für den Transport von klassischem Stückgut (z.B. Kisten, Zelluloseballen, o. Ä.). Im Gegensatz hierzu transportieren Massengutschiffe schüttbare Trockenprodukte (z.B. Trockengutfrachter für Erze oder Kohle) oder flüssige Transportgüter (z.B. Tanker für Öl oder Flüssiggas). In der Klassifikation nach Nuhn werden RoRo-Schiffe, welche den Transport von auf Achsen beweglicher Güter (u.a. Fertigfahrzeuge, selbstfahrende Großgeräte und Güter auf Rolltrailern) übernehmen, als gesonderte Schiffsgruppe ausgewiesen. Durch die rollende Beladung mit Gütern sind keine zusätzlichen Infrastruktureinrichtungen, wie beispielsweise Containerbrücken oder Hafenkranen für den Umschlag von Gütern notwendig (Mattfeld, 2006; Bichou, 2009).

Analog zu den Schiffstypen in Abbildung 14 können auch verschiedene Terminaltypen klassifiziert werden. Die folgende Listung von Terminaltypen nach Bichou gibt eine umfassende Übersicht und beschreibt in Kürze deren relevante Charakteristika (Bichou, 2009). In ähnlicher Weise differenziert auch das Statistische Bundesamt die verschiedenen Ladungsarten nach Massen- und Stückgut sowie den jeweiligen Terminaltypen (Bundesamt für Statistik, 2019):

- Massengutterminals: Massengut, wie unter anderem Getreide, Erz oder Kohle kann sowohl mit kontinuierlichen (Saugvorrichtungen) oder diskontinuierlichen Umschlagsmitteln in Massengutterminals umgeschlagen werden. Nach dem Umschlag vom Schiff wird das Massengut entweder auf Halden oder in speziellen Lagereinrichtungen (Silos) auf dem Hafengelände gelagert (Günthner et al., 2014).
- Flüssiggutterminals: Üblicherweise werden Öl, dessen Derivate sowie verflüssigtes Gas als flüssiges Massengut verstanden. In Flüssiggutterminals werden die Flüssiggüter direkt mittels Pumpen in bzw. aus dem jeweiligen Silo und Tank der Hafenanlage umgeschlagen (Mangan et al., 2008)
- Containerterminals: Containerterminals dienen dem Umschlag von standardisierten Containern auf Containerschiffe mittels spezifischer Hafeninfrastruktur (Containerbrücken). Hierbei wird die containerisierte Ware zur Verladung mittels Lkw oder via Bahn angeliefert und temporär auf dem Terminalgelände zwischengelagert. Durch die Standardisierung von Containern können unterschiedlichste Güter mit den gleichen Umschlagsmitteln umgeschlagen und transportiert werden. Die hiermit verbundenen Skaleneffekte tragen im Wesentlichen zur hohen Effizienz von containerisierten Transporten bei (Voß et al., 2004; Olivier und Slack, 2006).
- Autoterminals: Dienen dem Umschlag von Fertigfahrzeugen von und auf RoRo-Schiffe (RoRo = Roll on Roll off) auf der eigenen Achse der Umschlagsgüter. Vor, bzw. nach der Verladung werden die Transportgüter auf dem Terminalgelände gelagert. Die Anlieferung der Fahrzeuge an das Terminal kann sowohl auf eigener Achse, als auch auf speziellen Lkws oder Waggons erfolgen (Mattfeld und Kopfer, 2003; Böse, 2012).

- 
- Fährterminals: Terminals für den Umschlag von Passagieren und Transportgütern. Zwar werden in Fährterminals die Fahrzeuge (Pkw und Lkw) analog zu dem Umschlag auf Autoterminals auf der eigenen Achse umgeschlagen, jedoch werden die Umschlagsgüter nicht langfristig gelagert. Auch der Umschlag selbst findet in der Regel durch die einzelnen Fahrzeugführer und nicht durch Personal des Terminals statt (Talley, 2009).
  - Multipurpose-Terminals (Break-Bulk-Terminals): Die Terminalinfrastruktur ist nicht spezialisiert für ein bestimmtes Schiff oder Ladungsart ausgelegt. Diese Terminals sind besonders durch Flexibilität der Umschlag- als auch der Lagerressourcen gekennzeichnet. Schnelle Umrüstungen für verschiedene Ladungs- und Entladungssituationen sind beispielsweise durch die Nutzung von flexiblen Ressourcen wie beispielsweise Mobilkränen oder schiffseigenen Umschlagshilfen möglich. In der Regel ist die Umschlagproduktivität geringer als bei spezialisierten Terminals (Daganzo, 1990; Bichou, 2009).

Seehäfen können folglich als komplexe Systemstandorte des maritimen Transports aufgefasst werden, indem verschiedene Hafenakteure den Umschlag und die Lagerung von Waren ermöglichen (Brinkmann, 2005). Hierbei dienen Hafenprozesse grundsätzlich zur Bewegung und zum Transfer von Waren und Transportgütern zwischen verschiedenen Transportmedien (Bichou, 2009). Huber führt an, dass eine reine Beschränkung auf die Umschlagfunktion nicht ausreichend ist, um die übergreifende Rolle und die Funktion von Seehäfen zu erfassen. Vielmehr sind Häfen Knotenpunkte in regionalen oder auch globalen Logistikketten, deren weitere Funktion in der raumzeitlichen Synchronisation der Güterflüsse besteht. (Huber, 2014). Somit bilden die Häfen komplexe Netzwerke mit verschiedenen maritimen Standorten, die eine eigenständige Dynamik erzeugen (Ducruet, 2013, 2017). Diese Dynamiken erwachsen einerseits aus den jeweiligen dispositiven Angebots- und Nachfragesituationen, welche Transporte nach sich ziehen und andererseits aus dem Modus, des jeweiligen Ausbaus der Linienverkehre der Reedereien, um diesen Transportbedarfen zu begegnen. Die folgende Abbildung 15 zeigt systematisiert verschiedene Linienarten. Je nach Gestaltung der Linienverkehre können die hieraus resultierenden Schiffsanläufe unterschiedliche Dynamiken in den einzelnen Häfen und der gesamten verbundenen Logistikkette induzieren. Insbesondere können bei Loop- und Round-the-world-Verkehren teils sehr unterschiedliche zeitliche Verteilungen der Schiffsanläufe und damit volatile Schwankungen der ein- und ausgehenden Gütermengen entstehen. Diese Linienverkehre sind speziell im Bereich der RoRo-Schifffahrt zu finden. Zusätzliche Dynamik kann während der Fahrt auf den geplanten Routen durch Anpassungen der Durchführungsparameter (Anlaufreihenfolge der Häfen oder die Schiffsgeschwindigkeit) aus Sicht eines Hafenstandorts entstehen (Andersson et al., 2015). Auch Carbone und Martino beschreiben eine zunehmende vertikale Integration in globalen Lieferketten und charakterisieren Seehäfen als dynamische Knotenpunkte in

internationalen Produktionsnetzwerken (Carbone und Martino, 2003). Weiterhin erkennen sie, dass neben dem reinen Containerumschlag diese Tendenz insbesondere für die weltweiten automobilen Supply Chains zu beobachten ist. Auch Dias et al. (2010) sehen die zunehmende Bedeutung von Automobilterminals in der automobilen Logistikkette (Dias et al., 2010). Wie bereits unter 2.1.2 beschrieben, kann die dynamische Komplexität eines Systems in interne und externe Dynamik differenziert werden.

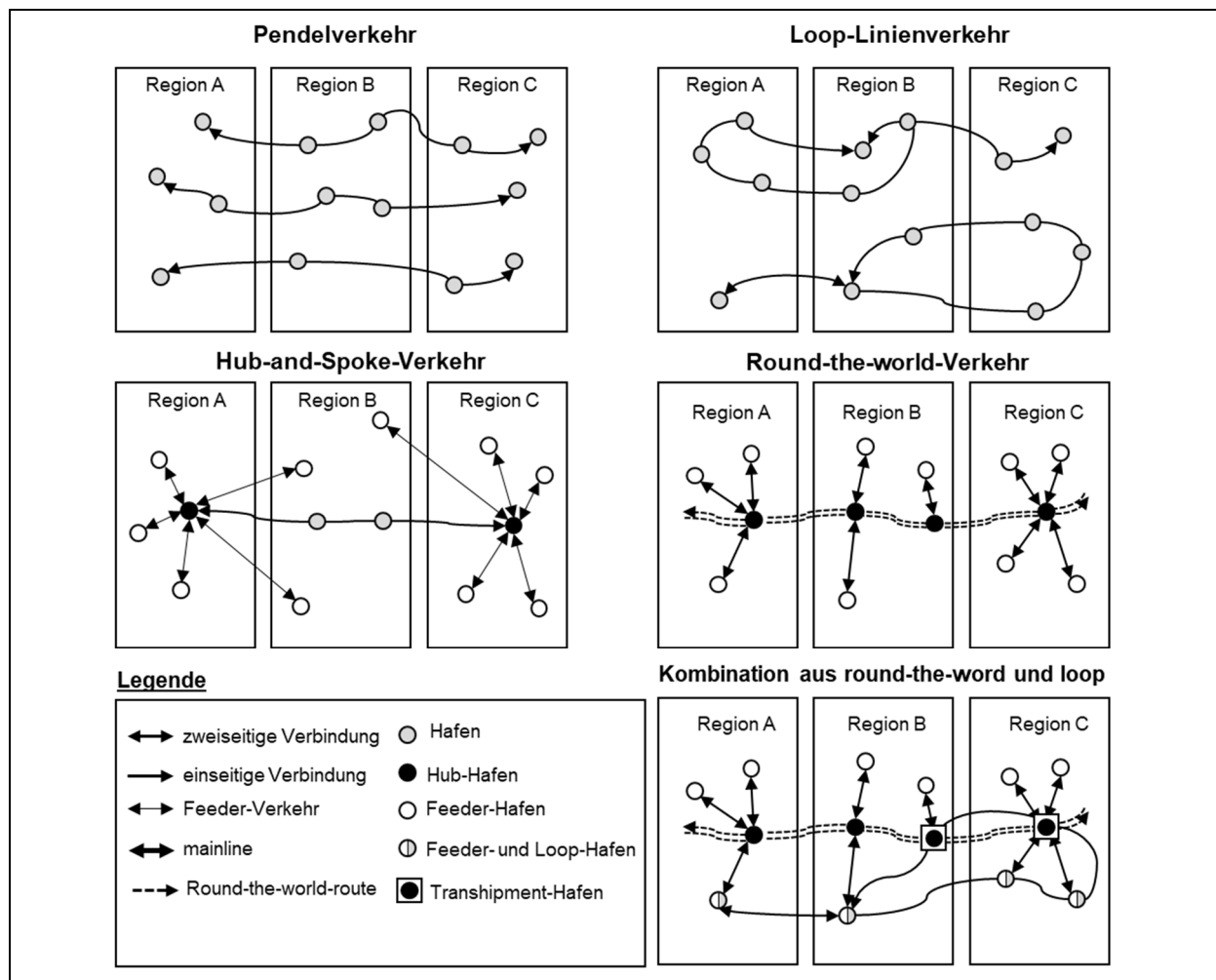


Abbildung 15: Schiffslinienverkehre (Huber, 2014)

Die externe Dynamik von Seehäfen im Allgemeinen und von Automobilterminals im Speziellen wird durch marktseitige Dynamiken (z.B. marktseitige Volumenschwankungen) und die direkt aus den Linienverkehren resultierenden Warenein- und Warenausgängen (u.a. Anlaufhäufigkeit von Schiffen) verursacht. Die interne Dynamik hingegen resultiert aus dem Zusammenspiel der Terminalprozesse und der damit verbundenen Planungsaufgaben.

Nachdem Automobilterminals als Seehäfen eingeordnet und ihre Rolle in den automobilen Lieferketten angerissen wurden, sollen nun die Kernfunktionen und Planungsaufgaben von Automobilterminals im Rahmen des deskriptiven Ziels näher gefasst werden.

---

## 2.5 Planung und Steuerung von Automobilterminals

Im Rahmen des deskriptiven Ziels dieser Arbeit wurden zunächst die allgemeinen Begriffe Hafen und Terminal klar voneinander abgegrenzt sowie Automobilterminals als spezifische Untergruppe in den Hafenbegriff eingeordnet. Im Folgenden werden Automobilterminals als Bestandteil globaler Wertschöpfungsketten adressiert, um die Ursachen externer Dynamik genauer zu untersuchen. Die Planung und Steuerung der logistischen Prozesse auf Automobilterminals sollen im Detail adressiert werden, um mögliche Ursachen für terminalinterne Dynamiken zu adressieren

### 2.5.1 Autoterminals als Bestandteil globaler Lieferketten

Die Art der durchzuführenden Umschlagsleistung und der hiermit verbundenen logistischen Prozesse auf Automobilterminals kann je nach Terminal stark variieren. Sie kann sich entweder in ihrer Reinform ausschließlich auf den reinen Warenumsschlag beschränken, oder weitere Wertschöpfungstätigkeiten umfassen. Bei allen Ausprägungen sind die Prozesse durch Multimodalität geprägt (Paixao und Marlow, 2001; Böse et al., 2009). Auch Beškovnik und Twrdy (2011) unterstreichen den multimodalen Charakter von Automobilterminals als integrale Eigenschaft dieser Terminals (Beškovnik und Twrdy, 2011). Demzufolge können Automobilterminals in drei generelle Subsysteme untergliedert werden.

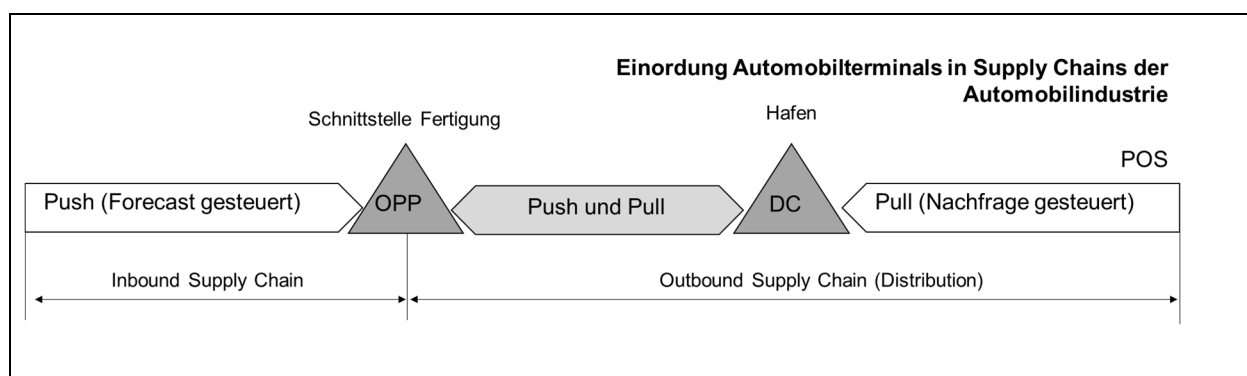
- Wasserseitiges Subsystem mit entsprechenden Schiffsliegeplätzen für alle Schiffsoperationen (Laden und Löschen)
- Landseitiges terminalinternes Yard-Subsystem für die Durchführung von Fahrbewegungen zwischen Lagerflächen, ggf. Technikbearbeitungen und den Verkehrsträgern (Schiff, Bahn, Lkw)
- Landseitiges Subsystem für die An- und Auslieferung von Fertigfahrzeugen

Analoge Beschreibungen von Automobilterminals können auch bei weiteren Autoren gefunden werden (u.a. (Fischer und Gehring, 2005; Böse et al., 2009)). Diese materialflussorientierte Gliederung der Terminal-Subsysteme ist hilfreich bei der Identifikation und Systematisierung von relevanten operativen Prozessen und ihren korrespondierenden Planungsschritten. Sie eröffnet weiterhin die Möglichkeit die Einbindung in die internationalen automobilen Supply Chain zu verstehen. So unterstreichen beispielsweise Dias et al. (2010) die Integration von Automobilterminals als Knotenpunkt in die Supply Chain als besonderes Merkmal dieser Terminalart (Dias et al., 2010). Selbstverständlich können auch Containerterminals als Bindeglied in globalen Supply Chains verstanden werden (Woo et al., 2013; Wang und Cullinane, 2015). Im Vergleich zu Containerterminals sind bei Autoterminals die Kunden- und Auftragsstrukturen anders aufgebaut: anstelle von vielzähligen temporären

---

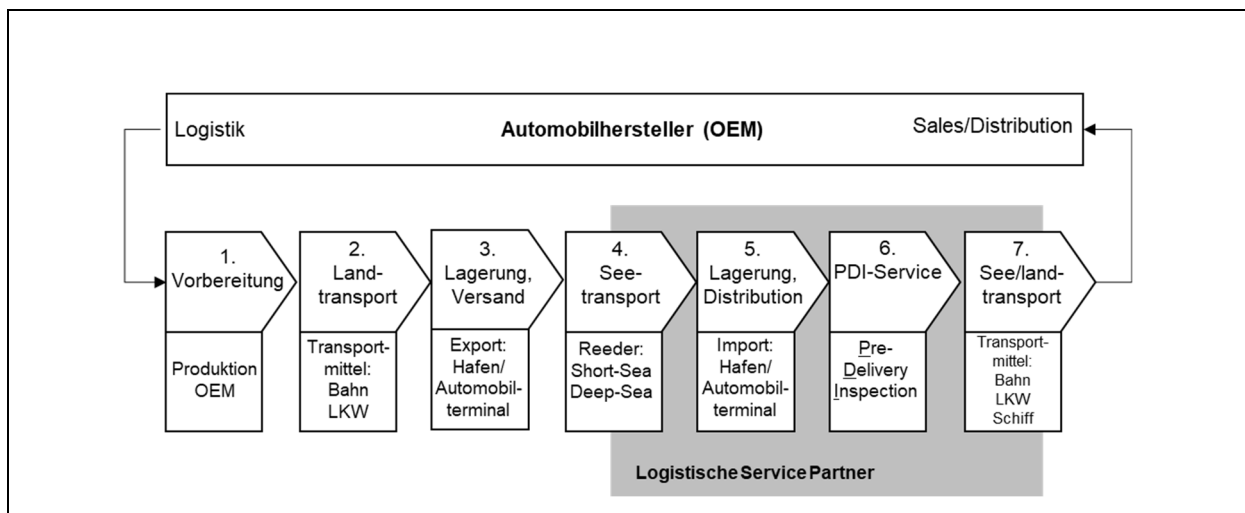
Kundenbeziehungen und häufigen dispositiven Spot-Geschäften bestehen in der Regel langfristige vertragliche Beziehungen mit vergleichsweise wenigen Kunden (Reedereien und Fahrzeug-OEM) (Beškovnik und Twrdy, 2011). Durch diese Ausrichtung auf einen kleinen Kundenkreis und die spezifische Ausrichtung auf die Fahrzeughersteller als Kunden, resultiert eine tiefere Einbindung in die Supply Chain. Konzeptionell sind derartige vertragliche Verflechtungen für die Erbringung von logistischen Leistungen ein charakteristisches Merkmal der third party Logistik (3PL) (Marasco, 2008). Diese kann als gebündelte Leistungserbringung sowohl von klassischen logistischen Aufgaben wie Transport, Umschlag und Lagerung, als auch die Leistung von zusätzlichen wertschöpfenden Tätigkeiten aufgefasst werden (Selviaridis und Spring, 2007). Ursprünglicherweise beziehen sich derartige längerfristige organisationsübergreifende Logistikbeziehungen vornehmlich auf den Bereich der Produktions- und Handelslogistik. Hierbei determiniert das Zusammenwirken der Netzwerkakteure maßgeblich die Effizienz des Gesamtnetzwerks (Lanza et al., 2013). Aufgrund der beschriebenen Eigenschaften von Automobilterminals können sie auch auf diese bezogen werden. Wie in anderen Bereichen der 3PL steht auch in der automobilen Supply Chain und den damit verbundenen internationalen Transporten über Automobilterminals eine möglichst effiziente Aufstellung der gesamten Wertschöpfungskette im Vordergrund. Hierbei nehmen die Fahrzeughersteller als fokales Unternehmen der Supply Chain eine zentral gestaltende Rolle als Taktgeber ein (Harland et al., 2001; Christopher und Peck, 2004). Für die Auswahl von entsprechenden Logistikpartnern hat Aguezoul (2014) anhand einer umfassenden Literaturanalyse besonders relevante Kriterien abgeleitet. Neben den reinen Kosten für die Leistungserbringung stehen die partnerschaftlichen Beziehungen zwischen den Akteuren, die Servicequalität, der Grad der ausgetauschten Informationen, die Flexibilität und die Liefertreue im Vordergrund (Aguetzoul, 2014). Auch Dias et al. (2010) sehen in diesen Faktoren wichtige Einflussgrößen für die Attraktivität eines Terminals im Rahmen der automobilen Supply Chain. Sie beschreiben die zentrale Rolle von Automobilterminals als logistischen Pol in der Wertschöpfungskette, welcher nicht nur als reiner Knotenpunkt, sondern auch als kritischer Wettbewerbsfaktor für die gesamte Supply Chain zu sehen ist. Einerseits wird die Wettbewerbsfähigkeit der gesamten Kette durch die Leistungsfähigkeit des logistischen Pols determiniert, andererseits sind die Terminals durch ihre enge Einbindung direkt den in der Supply Chain auftretenden Dynamiken ausgesetzt. Somit wirken die bei logistischen Systemen generell beobachtete externe dynamische Komplexität, welche aus den Verflechtungen mit der Supply Chain herrühren, auch bei Automobilterminals. Die inhärenten dynamischen Wechselwirkungen mit den übrigen Akteuren der Supply Chain (u.a. Hersteller, Reeder oder Einsebahnverkehrsunternehmen) wirken direkt auf die Prozessplanung und die -ausführung von Automobilterminals. In diesem Zusammenhang können die Terminals als klassischer Entkopplungspunkt (decoupling point – DP) in einer Supply Chain gesehen werden

(Dias et al., 2010). Aus theoretischer Perspektive unterteilen diese Entkopplungspunkte Supply Chains in kundenauftragsneutrale und kundenauftragsgebundene Teile (Mason-Jones und Towill, 1999). Die Lage dieses Entkopplungspunkts kann je nach Art der Supply Chain unterschiedlich ausgestaltet sein. Üblicherweise sind Kundenaufträge für das Endprodukt der Supply Chain nicht in allen Stufen bekannt. Der Oder-Penetration-Point (OPP) beschreibt hierbei den logischen Eingangspunkt von Kundenaufträgen für die Supply Chain (Olhager, 2003). Die Bestandteile der Supply Chain vor dem OPP können nicht durch konkrete Aufträge geplant werden, sondern müssen aufgrund von Absatzprognosen gesteuert werden. Nachdem Eingang von konkreten Kundenaufträgen, kann innerhalb der Supply Chain mittels der begleitenden Daten ab dem OPP auftragsbasiert geplant werden. In der Automobilindustrie sind zwei grundsätzliche Produktionsphilosophien zu sehen. Bei einer make-to-order Strategie wird der OPP unmittelbar vor dem Produktionsschritt des Herstellers lokalisiert (Hopp und Spearman, 2004). Somit werden die Fahrzeuge direkt in der Produktion auf die Kundenwünsche abgestimmt. Dem entgegen steht das make-to-stock Prinzip, bei dem Fahrzeuge möglichst lange kundenauftragsneutral und forecastbasiert produziert und erst kurz vor der Auslieferung ggf. besonderen Kundenwünschen angepasst werden. Unabhängig von der Lage des OPP ist nach Dias et al. ein zweiter weiterer DP in der automobilen Logistikkette zu finden, um einen möglichst effizienten Transport der Fahrzeuge zu den Zielmärkten zu ermöglichen. Hierbei wird der Transport der Fahrzeuge möglichst lang unabhängig von korrekten Kundenaufträgen durchgeführt. Somit können aufgrund der geringeren Zuordnungskomplexität die Skaleneffekte besser genutzt und die vorhandenen Lager und Transportkapazitäten effizienter ausgelastet werden. Fahrzeuge werden möglichst spät den korrekten Transportaufträgen (beispielsweise Schiffsreisen) zugeordnet. Erst mit dieser Zuordnung wird in dem Transportnetzwerk der konkrete Auftrag für die weiteren Transport- und Lagerungsschritte relevant. Daher ist dieser Punkt als zweiter Entkopplungspunkt zu sehen, welcher üblicherweise in dem Verfügungsbereich der Automobilterminals zu verorten ist. Die folgende Abbildung 16 verdeutlicht diesen Zusammenhang.



**Abbildung 16: Automobilterminals als Entkopplungspunkt in der Supply Chain (Dias et al., 2010)**

Der Bereich der Supply Chain zwischen OPP und DC unterliegt sowohl Push- als auch Pull-Dynamiken. Die Push-Dynamik ist im Wesentlichen mit den begrenzten räumlichen Kapazitäten der Hersteller zu begründen. Damit die Produktion der Werke nicht unterbrochen wird, ist eine kontinuierliche Werksentsorgung notwendig. Die Fahrzeuge werden unabhängig von zugrundeliegenden Kundenaufträgen weitertransportiert. Hierbei werden die Fahrzeuge nicht durch einen Auftrag gezogen, sondern direkt zu den Terminals transportiert (gepushed). Indes führen konkrete Händlerabrufe oder vereinbarte Liefertermine auf den Zielmärkten zu einer pull-basierten Nachfrage und entsprechenden Abrufen in den Häfen. Durch die Kundennachfrage werden Fahrzeuge auf konkrete Schiffsreisen gebucht. Somit wirken in Automobilterminals in ihrer Rolle als logistischer Entkopplungspunkt in der Supply Chain sowohl Push- als auch Pull-Dynamiken. Die folgende Abbildung 17 verortet die physischen Prozesse und verdeutlicht die Rolle der Automobilterminals in der Supply Chain.



**Abbildung 17: Zusammenfassung der Terminalprozesse und ihre Schnittstellen (Fischer und Gehring, 2006)**

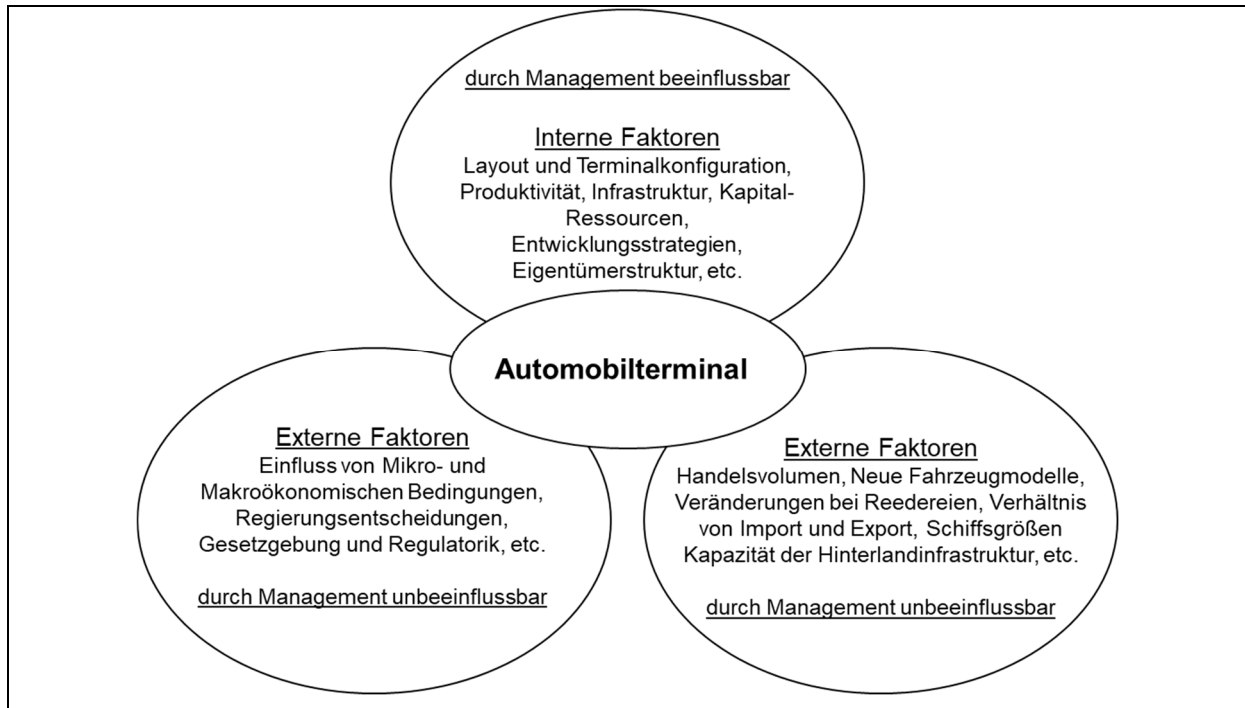
Die Abbildung 17 illustriert, wie die OEMs als fokale Unternehmen die Wertschöpfungskette sowohl auf die Import- als auch auf die Exportwarenströme steuern. Hierbei werden die Felder, in denen Terminalbetreiber klassischerweise als 3PL agieren, Grau markiert.

Um ihrer Rolle als zentrales Element in der automobilen Logistikkette gerecht zu werden, müssen die planerischen Aktivitäten und die Steuerung der ausführenden Prozesse diese unterschiedlichen Grunddynamiken berücksichtigen und auf diese entsprechend reagieren, um eine effiziente Prozessaufführung gewährleisten zu können. Auch Beskovnik und Twrdy (2011) erkennen diesen Zusammenhang zwischen den externen dynamischen Einflussfaktoren und der Terminalleistung. Folglich existieren direkt beeinflussbare Einflussfaktoren, die aus Sicht des jeweiligen Terminals direkt adressiert werden können und nicht beeinflussbare Faktoren, deren Auswirkungen im Rahmen der planerischen Prozesse



---

berücksichtigt werden müssen. Die folgende Abbildung 18 zeigt diese Einflussfaktoren im Detail. Werden die Betrachtungsgrenzen, im Sinne einer klassischen Systemgrenze um das physische Terminal und seine Prozesse gezogen, so wirken, wie auf jedes sozio-ökonomisches System externe Rahmenbedingungen, wie beispielsweise die rechtlichen Rahmenbedingungen, die globale Nachfrage oder weitere makroökonomische Faktoren.

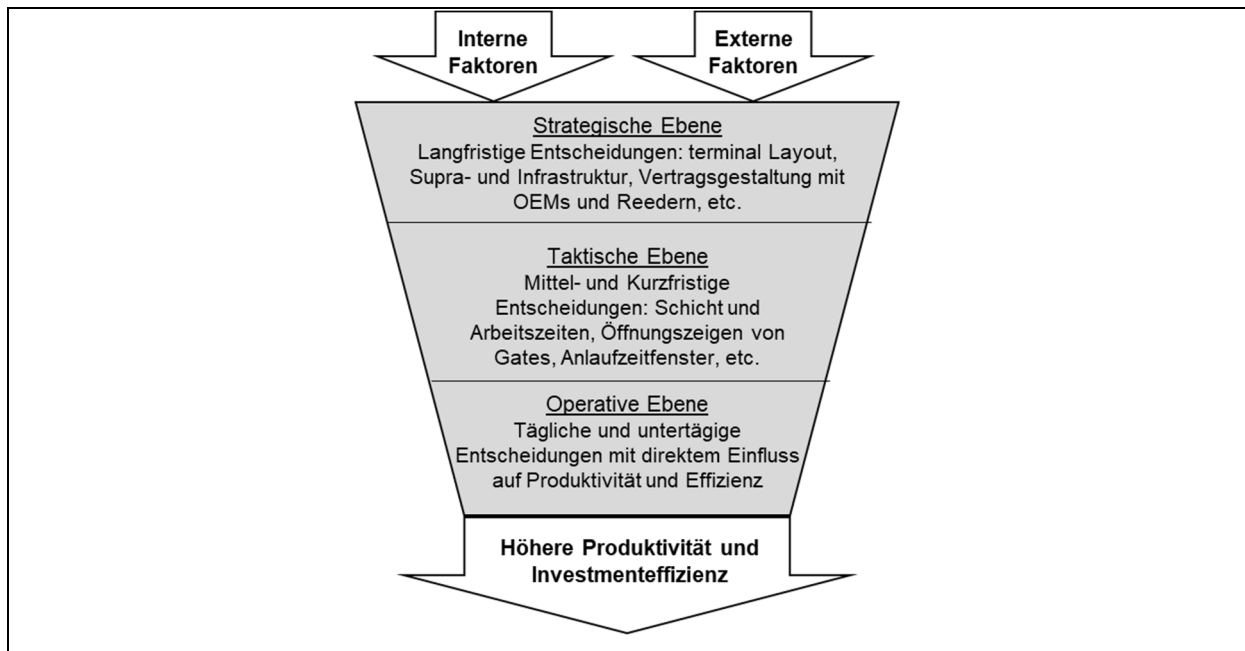


**Abbildung 18: Einflussfaktoren auf die Terminalleistung nach (Beškovnik und Twrdy, 2011)**

Augenscheinlich unterliegen diese Faktoren nicht der Entscheidungshoheit des Systems Autoterminal und können somit als klassische Größen für externe Dynamik induzierende Einflussgrößen gesehen werden. Beskovnik und Twrdy (2011) identifizieren weitere, direkt mit den Geschäftsprozessen verbundene externe Einflussgrößen, auf die Terminals ebenfalls keinen Einfluss nehmen können. Diese Einflüsse sind anders als die makroskopischen und globalen Einflussfaktoren durch einzelne Akteure, insbesondere die Kunden von Terminals, zu beziehen. Hierzu zählen unter anderem die Anzahl verfügbarer Modellvarianten, Verschiebungen in Handelsvolumen (beispielsweise durch Volumenverschiebungen von einem Zielmarkt zu einem anderen), die Gestaltung der Liniendienste der Reeder (siehe Abbildung 15) und damit verbunden die Anlaufhäufigkeiten in den Häfen. Aber auch kurzfristig wirkende Entscheidungen können einen Einfluss auf die Dynamik der Terminalprozesse haben, indem etwa die Kapazität der eingesetzten Schiffe variiert. Um auf diese externen Einflussgrößen reagieren zu können, sehen Beskovnik und Twrdy (2011) die Gestaltung der operativen Prozesse, Entscheidungsaktivitäten unterschiedlichen temporalen Ebenen, wie beispielsweise durch Festsetzen von Terminallayouts, die Gestaltung des Einsatzes von

---

Arbeitskraft und infrastrukturellen Ressourcen. Mit dem Ziel, die Prozesse effizient umsetzen zu können. Die Abbildung 19 zeigt diese Ebenen.



**Abbildung 19: Temporale Entscheidungsebenen in Anlehnung an (Beškovnik und Twrdy, 2011)**

Auch Mattfeld sieht in der Gestaltung und der Planung der Terminalabläufe eine wesentliche Eingriffsgröße, um den extern wirkenden dynamischen Faktoren entgegenzuwirken und die Prozesse entsprechend effizient zu gestalten. Er differenziert die hiermit verbundenen Planungsaufgaben auf der temporalen Ebene nach langfristig ausgerichteter, taktischer und operativer Planung mit kurzfristiger Ausrichtung (Mattfeld, 2006). Auf der strategischen Ebene sind langfristig wirkende Entscheidungsprobleme zu verorten. Zu diesem Bereich zählt unter anderem die Planung der Terminalverkehrsinfrastruktur (u.a. neue Gleisentladeanlagen oder neue Kajeplätze). Oftmals betreffen somit die strategischen Entscheidungen infrastrukturelle Aspekte, welche in der Regel erst nach den vorgesehenen Abschreibungsdauern von mehreren Jahren verändert werden. Entscheidungen auf der taktischen Ebene haben hingegen einen deutlich kürzeren Zeithorizont und dienen der Vorbereitung der operativen Planung und der Prozessdurchführung, wie beispielsweise die Liegeplatzvorplanung. In der Regel basieren die strategischen und taktischen Planungsschritte überwiegend auf Prognosen und Forecastdaten (Dias et al., 2010). Wie in anderen globalen Produktionsnetzwerken, werden Forecasts lokal durch die einzelnen Akteure erzeugt und relevante Informationen bedarfsgerecht weitergegeben (Lanza et al., 2019). Im Gegensatz hierzu beruht die operative Planung auf konkreten Auftragsdaten. Sie verfeinert die Ergebnisse der vorherigen Planungsschritte und passt diese an kurzfristige Veränderungen an, um somit auch auf entsprechende externe Dynamiken reagieren zu können. Wie in anderen Bereichen der

Logistik, resultiert aus den einzelnen operativen Planungsaufgaben ein komplexes Planungssystem mit verschiedenen Interdependenzen, die eine integrierte Lösung aufgrund der rechnerischen Komplexität nicht zulässt. Zwar existieren in der Literatur vereinzelt Ansätze zur integrierten Lösung von Teilaufgaben, wie beispielsweise die kombinierte Stellplatz- und Personalplanung (Fischer und Gehring, 2005), doch auch die hieraus resultierenden Ergebnisse sind in eine sukzessive Gesamtplanung mit den übrigen Planungsproblemen zu verzahnen. Üblicherweise wird daher in einer problembezogenen Sichtweise eine Dekomposition des Gesamtplanungsproblems in einzelne, sukzessiv zu lösende Problemstellungen vorgenommen und Einzellösungsverfahren für die resultierenden Teilprobleme vorgeschlagen (Mattfeld, 2006). Böse beschreibt die einzelnen logistischen Abläufe und die hiermit korrespondierenden Aufgaben in Form eines Referenzmodells (Böse, 2012). Dieses Referenzmodell adressiert die Prozesse und die Planungsaufgaben auf einer physischen und einer dispositiven Ebene und bildet eine Analogie zu klassischen PPS-Modellen, indem Kern- und Querschnittsaufgaben definiert werden (Böse, 2012). Durch die Einführung dieser Betrachtungsebenen könnten die Abhängigkeiten zwischen den Planungsproblemen grundsätzlich systematisch erfasst werden. Allerdings fokussiert dieses Referenzmodell auf der funktionalen Beschreibungsebene auf die physischen Fahrzeugbewegungen. Weitere dispositive Problemstellungen, wie beispielsweise die Liegeplatzplanung, werden nicht explizit berücksichtigt. Daher schlagen Görges und Freitag eine vereinende Sichtweise aus problembezogener Perspektive und dem Referenzmodell vor, um eine durchgängige Analyse der Abhängigkeiten zu ermöglichen (Görges und Freitag, 2019a). Die folgende Abbildung 20 zeigt die Kernelemente dieses Ansatzes.

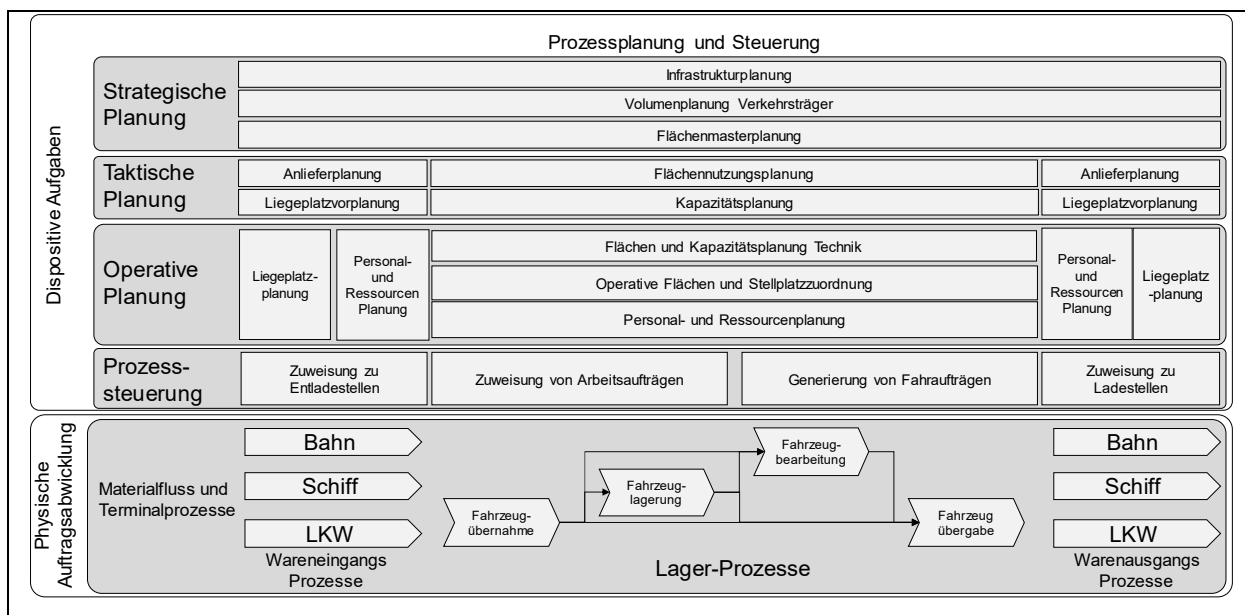


Abbildung 20: Planungsaufgaben für Automobilterminals (Görges und Freitag, 2019a)

---

Auf der physischen Ebene sind die Materialflussprozesse verortet. Sie beschreiben auf einer abstrakten Ebene alle Fahrzeugbewegungsarten auf einem Automobilterminal vom Wareneingang über die Verkehrsträger (Bahn, Schiff, Lkw), die terminalseitigen Umfuhren zwischen den Lagerplätzen und Technikbearbeitungen und den Warenausgangsprozessen via der Verkehrsträger. Die Ebene der physischen Auftragsabwicklung ist hierbei an dem Referenzmodell von Böse orientiert. Auf der dispositiven Seite ist zwischen der strategischen, taktischen und operativen Planung sowie der operativen Prozesssteuerung zu unterscheiden. Weiterhin zeigt die Abbildung die einzelnen Planungsaufgaben in den jeweiligen Teilbereichen dar.

Mit Hilfe des in der Abbildung 20 dargestellten kaskadierten Planungssystems sowie den Überlegungen zur Einbindung von Automobilterminals können die eingangs formulierten Arbeitshypothesen als wesentlicher Beitrag zum deskriptiven Ziel dieser Arbeit untersucht werden. Um die Fragestellungen der Arbeitshypothesen abschließend zu beantworten, ist jedoch ein tieferes Verständnis der einzelnen Planungsaufgaben erforderlich. Daher werden im Folgenden die einzelnen dispositiven Aufgaben fokussiert.

### 2.5.2 Physische Auftragsabwicklung

Die physischen Abläufe in Automobilterminals können, wie in der Abbildung 20 dargestellt, auf wenige Standardaufgaben heruntergebrochen werden. Im Rahmen dieser Arbeit werden, wie durch Piotrowski und Böse vorgeschlagen (Böse et al., 2009), die folgenden physischen Grobprozesse unterschieden:

- Fahrzeugvereinnahmung,
- Fahrzeuglagerung,
- Fahrzeugbearbeitung und
- Fahrzeugübergabe

Die Fahrzeugvereinnahmung beschreibt das physische Ankommen eines Fahrzeugs auf dem Terminal und beinhaltet in der Regel auch den rechtlichen Gefahrenübergang. Hierbei werden ankommende Fahrzeuge durch Terminalmitarbeiter systemisch erfasst. Der Erfassungsvorgang kann entweder an speziell eingerichteten Orten (z.B. Checkschleusen) oder direkt auf dem ankommenden Verkehrsmittel durch mobile Datenerfassungsgeräte vorgenommen werden (Böse et al., 2009). Da oftmals mit diesem Schritt ein Haftungsübergang verbunden ist, werden die Fahrzeuge bei der Vereinnahmung auf mögliche Schäden geprüft. Ankommende Fahrzeuge bedürfen in den meisten Fällen einer Zwischenlagerung (beispielsweise bis zum Eintreffen eines Schiffs für den Export, oder das

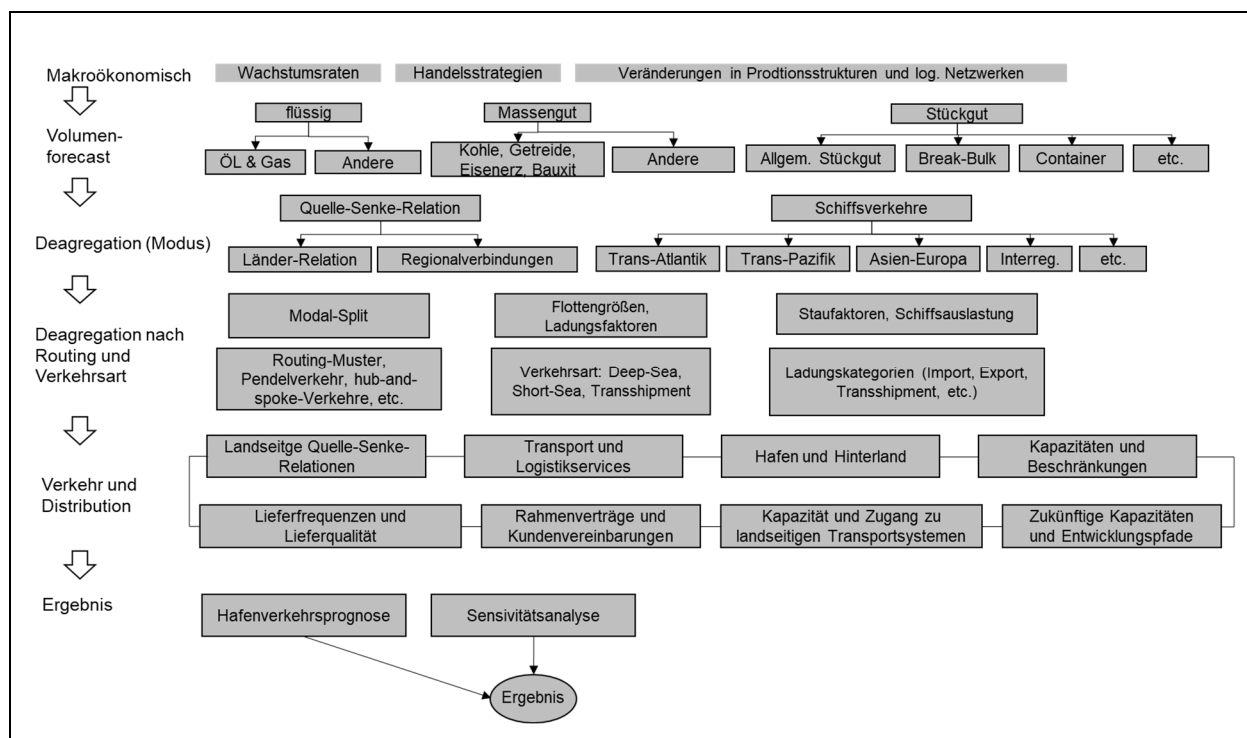
---

Eintreffen eines Händlerabrufs im Import). Die Fahrzeuge werden hierfür durch das Fahrpersonal des Terminals von dem Verkehrsmittel gefahren und zu einem vorgeplanten Lagerplatz verbracht (Schukraft et al., 2017). Mitarbeiter werden nach dem Abstellen eines Fahrzeugs durch Shuttles an den Stellplätzen abgeholt und erneut zum aktuellen Verkehrsmittel als Ausgangsort der nächsten Fahrbewegung verbracht (Hoff-Hoffmeyer-Zlotnik et al., 2020b). Je nach Kundenanforderungen kann die Durchführung von technischen Bearbeitungsschritten an den Fahrzeugen erforderlich sein (z.B. Einbau von Sonderausstattungsmerkmalen oder die Behebung von Transportschäden). Ähnlich wie bei der Lagerung werden Fahrzeuge zwischen den Lagerflächen und den Flächen für die Technikbearbeitung verfahren. Hierbei kann die zeitliche Durchführungsdauer je nach Art und Umfang der Tätigkeit stark variieren. Denkbar sind standardmäßig planbare Tätigkeiten wie die Fahrzeugwäsche ebenso wie außerplanmäßige Reparaturarbeiten. Bevor ein Fahrzeug zur technischen Bearbeitung gefahren wird, werden in der Regel die durchzuführenden Arbeiten zeitlich geplant. Bei der Fahrzeugübergabe verlassen die Fahrzeuge physisch das Terminal. Wie beim Eingang findet auch hier klassischerweise ein Gefahrenübergang statt. Physisch kann die Fahrzeugübergabe auf allen Verkehrsmodi stattfinden (Bahn, Schiff, Lkw). Mitarbeiter des Terminals fahren hierbei die Fahrzeuge entweder direkt in das Verkehrsmittel oder stellen Sie auf definierten Übergabeflächen bereit. Auch in diesem Schritt wird der Warenausgang systemisch durch entweder spezielle Einrichtungen (z.B. Checkschleusen) oder durch mobile Datenerfassungsgeräte erfasst (Böse, 2012).

### 2.5.3 Strategische Planung

Grundsätzlich kann der Begriff strategische Planung aus unterschiedlichen Perspektiven gesehen werden. Je nach Lesart können strategische Entscheidungen einerseits als Resultat von kreativen Abwägungsprozessen in einem unsicheren Umfeld verstanden werden. Andererseits kann argumentiert werden, dass strategische Planungsentscheidungen durch ein klares analytisches Instrumentarium für den jeweiligen systemischen Anwendungsfall abgeleitet werden (Heracleous, 1998). Trotz dieser grundsätzlichen Begriffsdualität wird in dieser Arbeit vornehmlich auf problembezogene Sichtweise von strategischer Planung fokussiert und die zugrundeliegenden Planungsprobleme für Automobilterminals gesondert betrachtet. Demnach liegt eine zentrale Aufgabe der strategischen Planung, wie durch Beskovnik und Twrdy (2011) beschrieben, in der langfristigen Ausrichtung eines Automobilterminals auf den langfristigen effizienten Terminalbetrieb und fokussiert auf die Ausgestaltung des Terminallayouts, die Gestaltung von Infra- und Suprastruktur sowie die Vertragsgestaltung mit externen Organisationseinheiten (u.a. Reeder, OEMs und anderen Transportdienstleistern). Auch Mattfeld (2006) zählt diese Aufgaben zu dem Bereich der strategischen Planung von Automobilterminals (Mattfeld, 2006). Die Abbildung 20 weist daher

die Teilaufgaben Infrastrukturplanung, Volumen und Verkehrsträgerplanung und Flächenmasterplanung als wesentliche Elemente der strategischen Planung von Automobilterminals aus. Aufgrund der langfristigen Ausrichtung dieser Planungsentscheidungen und der damit verbunden unsicheren Informationslage werden für strategische Planungen überwiegende Forecasts und Prognosen herangezogen (Dias et al., 2010; Taneja et al., 2012). Im Wesentlichen fokussieren die Forecasts auf zukünftig erwartete Volumenströme und hiermit verbunden auf die zu erwartenden Häufigkeiten des Abrufs von Terminalprozessen (z.B. Laden und Entladen von Verkehrsmitteln, Lagern von Fahrzeugen oder die Durchführung von Technikdienstleistungen). Oftmals liegen die Forecasts nicht auf dem planerisch relevanten Aggregationsniveau vor und bedürfen einer zusätzlichen Differenzierung. Durch geeignete Annahmen werden Differenzierungsschritte vorgenommen, indem durch Erfahrungswissen oder weitere Prognosen zusätzliche Eigenschaften abgeleitet werden (z.B. der erwartete Modell-Mix aus einer Volumenprognose). Bishou beschreibt diesen Forecasting-Prozess für Häfen, wie in der folgenden Abbildung 21 zu erkennen ist. Dieser Forecastingprozess kann auch auf Automobilterminals übertragen werden.



**Abbildung 21: Forecasting Framework in Anlehnung an Bishou (Bichou, 2009)**

In diesem kaskadierten Prozess werden ausgehend von dem Basisvolumen auf der obersten Ebene sukzessive Informationen disaggregiert. Zunächst wird nach den Quellen und Senken und anschließend nach den jeweiligen Fahrtgebieten für die Reeder differenziert. Ausgehend von diesem Volumen wird der jeweils zu bedienende Modalsplit, und die damit verbundenen Kapazitätsanforderungen an die vorhandenen Flächen und sonstige Infrastruktur (z.B.

---

verfügbare Bahnrampen). Die Abbildung 21 zeigt das allgemeine Framework nach Bishou, welches um spezielle Aspekte für Automobilterminals angereichert wurde.

Wie für andere Hafentypen ist insbesondere die Infrastrukturplanung auch für Automobilterminals eine sehr langfristig wirkende Planung. So werden unter anderem Planungen für neue Liegeplätze oder Umschlagsinfrastruktur, wie Bahnanschlüsse oder Bahnrampen über Zeiträume von mehreren Jahren festgelegt (Taneja et al., 2012). Aufgrund dieser sehr langfristigen Ausrichtung zählen diese gestalterischen Fragen zum Bereich der strategischen Planung. Folglich haben die getroffenen Entscheidungen direkte determinierende Auswirkungen auf den später möglichen Terminalbetrieb. Wegen der sehr langfristigen Zeitskalen werden diese Planungen im Rahmen dieser Arbeit allerdings nicht als Stellgröße, sondern vielmehr als gesetzte Rahmengröße betrachtet. Hierbei umfasst die Festlegung des infrastrukturellen Rahmens die Ausgestaltung der folgenden Themenfelder:

- Anzahl Liegeplätze
- Art der Liegeplätze (Tiefgang, kontinuierlich oder diskontinuierlich, etc.)
- Verfügbare Terminalfläche (inklusive möglicher Parkregale)
- Anzahl Lkw-Lade und Entladeplätze
- Anzahl Bahnrampen
- Lagersegmentierung

Neben den klassischen Planungsgrößen, die üblicherweise auch im Rahmen der Planung anderer Hafentypen (wie beispielsweise Stückgut oder Containerhäfen) Gegenstand der Betrachtung sind, nimmt die Festlegung der Lagersegmentierung für Automobilterminals eine Sonderstellung ein. Sie legt das Grundprinzip der Fahrzeuglagerung fest. Hierbei sind die Lagerprinzipien gemäß der Zugriffsart zu unterscheiden. Bei einem Einzelzugriff kann jedes Fahrzeug zu jedem Zeitpunkt bewegt werden. Hierfür werden die Fahrzeuge entweder in sogenannten Fischgräten- oder Boxaufstellungen gelagert. Dem gegenüber steht eine Reihenaufstellung, in der die Fahrzeuge höher verdichtet gelagert werden können. Ein beliebiger Zugriff auf einzelne Fahrzeuge ist aufgrund der Verdichtung bei einer Reihenaufstellung nicht möglich (Mattfeld, 2006)

Im Gegensatz zu der sehr langfristig ausgerichteten Infrastrukturplanung unterliegt die sogenannte Flächenmasterplanung kürzeren Anpassungszyklen und kann durch das Terminalmanagement direkt beeinflusst werden. Ziel der Flächenmasterplanung ist hierbei eine möglichst ressourcenschonende Flächennutzung zu ermöglichen. Durch die geschickte Auswahl von Lagerflächen sollen im Kontext von Automobilterminals möglichst die Fahrwege

---

zwischen Eingangspunkt, Lagerflächen, etwaigen Technikbearbeitungsstationen und Ausgangspunkt verringert werden (Mattfeld, 2006; Cordeau et al., 2011). In der Regel umfasst die Flächenmasterplanung eine bereichsweise Zuordnung von Fahrzeuggruppen (z.B. Exportfahrzeuge für bestimmte Destinationen) zu Stellflächen. Die zeitliche Einordnung dieser Aufgabe wird durch verschiedene Autoren unterschiedlich vorgenommen. Aufgrund der langfristigen Orientierung an bekannten volumenbezogenen Daten wie bestehenden Verträgen und Absatzprognosen sehen einige Autoren die Flächenmasterplanung als Bestandteil der strategischen Planung, indem eine erste grobe Bereichszuweisung vorgenommen wird. Autoren wie beispielsweise Mattfeld (2006) schreiben den Vorgang der Flächenmasterplanung eher dem zeitlichen Bereich der taktischen Planung zu, indem angeführt wird, dass mit der Flächenmasterplanung neben den groben Bereichszuweisungen auch konkrete planerische Maßnahmen zur Stellplatzallokation von definierten Fahrzeugvolumen verbunden sind. Im Rahmen dieser Arbeit wird der Begriff Flächenmasterplanung auf die strategische Ausrichtung bezogen. Wie die Abbildung 20 zeigt, werden aufgrund der besseren Trennschärfe die Aufgaben der strategischen Flächenmasterplanung und der konkreten Flächennutzungsplanung unterschieden. Während im Zuge der Flächenmasterplanung grundsätzliche Anlieferungsprinzipien einbezogen werden, wird die konkrete Zuweisung von Verkehrsmitteln (Schiffe zu Liegeplätzen, Züge zu Bahnrampen) als Aufgaben der taktischen Planung verstanden. Somit legt die Flächenmasterplanung das grundsätzliche logische Konstrukt für die darauffolgenden Feinplanungsschritte fest. Sie definiert grobe Bereichszuordnungen sowie Regeln und Nebenbedingungen für die Zuordnung von Verkehrsmitteln zu den vorhandenen Infrastrukturelementen. Auf dieser Grundlage werden dann im Rahmen der taktischen Planung konkrete Umsetzungspläne für die Anlieferung, die Lagerung, die Bereitstellung von Technikdienstleistungen und die Verladung auf Verkehrsmittel übernommen.

#### 2.5.4 Taktische Planung

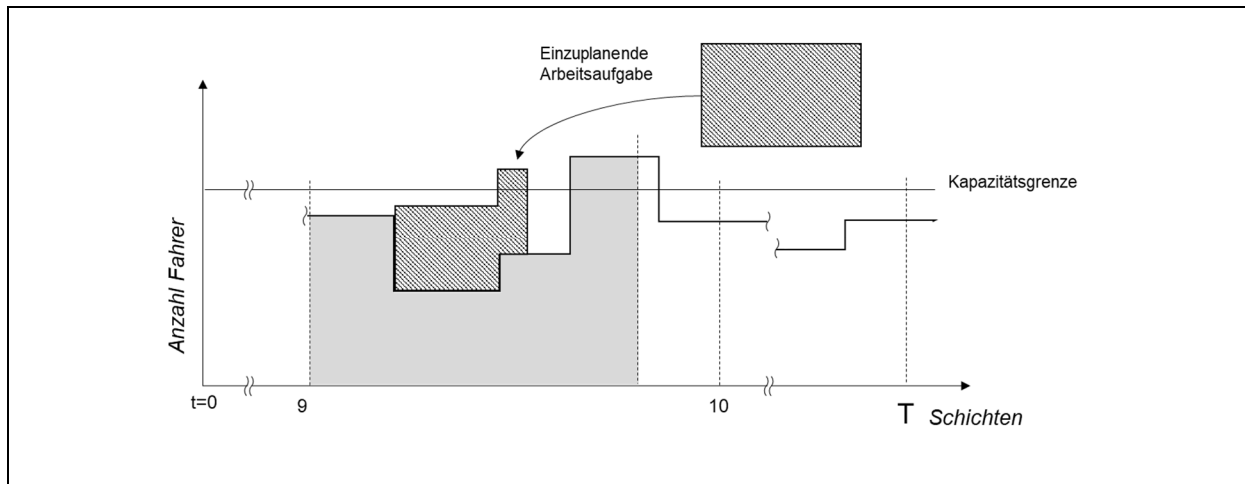
Auf der Ebene der taktischen Planung werden die Planungen der strategischen Planung für eine prozessuale Umsetzung operationalisierbar gemacht. Zu den Aufgaben der taktischen Planung gehören die Planung von Anlieferungen, die Liegeplatzvorplanung, die Flächennutzungsplanung und die Kapazitätsplanung. Für eine möglichst effiziente Lagerung von eingehenden und ausgehenden Fahrzeugvolumina werden die aus der strategischen Flächenmasterplanung resultierenden Bereichszuweisungen als Planungsgrundlage übernommen und die bestehenden Forecastdaten mit den konkret vorliegenden Planungsdaten abgeglichen. Zu diesen Planungsdaten gehören Avise für Anlieferungen der Fahrzeughersteller, Zug- und Lkw-Anmeldungen sowie die entsprechenden Port-Calls (Anlaufankündigungen) der Reedereien. Für den Bereich von Automobilterminals entwickelten



---

Cordeau et al. 2010 einen algorithmischen Ansatz für die Zuordnung von Fahrzeuggruppen zu Stellplatzbereichen. Wie bereits ausgeführt resultieren die betrachteten Fahrzeuggruppen aus den planerischen Forecastdaten angereichert um konkrete Avisinformationen (Cordeau et al., 2011). Die Problemformulierung als gemischt ganzzahliges lineares Programm ermöglicht die Berücksichtigung der Ein- und Ausgangspunkte, der geplanten Ein- und Ausgangszeitpunkte, der geplanten Verweildauer auf dem Terminal, das Volumen je Gruppe sowie die hiermit verbundenen Verfahrzeiten zwischen Lagerorten (Reihenlager) und den Zielorten der Fahrtbewegungen. Das formulierte Zuordnungsproblem ist NP-Hard und kann somit für größere Probleminstanzen nur durch heuristische Ansätze gelöst werden (Cordeau et al., 2011). Einen ähnlichen Ansatz schlagen auch Mattfeld und Orth (2007) vor. Sie beziehen die Aufgabe der Lagerplatzzuordnung allerdings auf die vorhandenen Personalkapazitäten und binden folglich Kapazitätsaspekte in ihren Planungsansatz mit ein. Verglichen mit der Abbildung 20, entspricht dieser Ansatz einer Integration der Kapazität und der Flächennutzungsplanung. Die planerische Komplexität wird hierdurch zusätzlich erhöht, indem durch diesen Integrationsschritt eine weitere Dimension in die Berechnung eingeführt wird. Sie beziehen in Ihrem Ansatz die Anlieferpunkte (Rampen, Liegeplätze und Lkw-Ladepunkte) als Ausgangspunkte von Fahrzeugströmen ein und beschreiben das gesamte Planungsproblem als verbundenes Netzwerk von Lagerorten, einem Satz an Aufgaben (Fahrtbewegungen induziert durch die Kundenwünsche). Sie schlagen einen Lösungsansatz auf der Grundlage eines evolutionären Lösungsverfahrens vor, indem zum einen der Personaleinsatz möglichst ressourcenschonend und gleichmäßig über die verschiedenen Planungsperioden allokiert ist. Das Ziel einer gleichmäßigen Auslastung kann mit dem des in der Produktionslogistik bekannten Loadbalancing, bzw. der kapazitätsorientierten Auftragsfreigabe verglichen werden. Auch Fischer und Gehring (2005) schlagen einen vergleichbaren Ansatz zur Lösung als integriertes Planungsproblem der Flächennutzungsplanung und Kapazitätsplanung vor. Konkret beschreiben Sie die Nutzung eines Multi-Agentensystems, welches auf der Grundlage der bekannten Informationen aus den Rahmenbedingungen (z.B. Vertragswerken) und bekannten Forecasts einerseits eine Flächenzuordnung von Fahrzeugvolumen und andererseits eine personelle Vordisposition übernimmt. Die Abbildung 22 zeigt die Grundintention des Ansatzes, indem neu einzuplanende Arbeitsaufgaben zeitlich in das vorhandene Personalkapazitätsgefüge eingepasst werden sollen. Hierbei ist der Umfang der Arbeitslast direkt abhängig von den Fahrstecken, welche mit der einzuplanenden Arbeitsaufgabe verbunden sind (Fischer und Gehring, 2005). Ähnlich wie der Ansatz von Mattfeld und Orth zielt die Kapazitätsplanung auf eine gleichmäßige Verteilung der zu erwartenden Arbeitslast auf die zu planenden Zeitperioden. Diese Ansätze zur integrierten Planung bestätigen den in der ersten Arbeitshypothese postulierten Zusammenhang zwischen den Allokationsentscheidungen der Flächenmasterplanung und den zeitlich darauf

aufbauenden Folgeplanungen, wie beispielsweise der Personalkapazitätsplanung. Durch die Integration der Problembereiche sollen Interdependenzen auf die Produktivität und zur Mitarbeiterverfügbarkeit besser in der Lösung berücksichtigt werden.



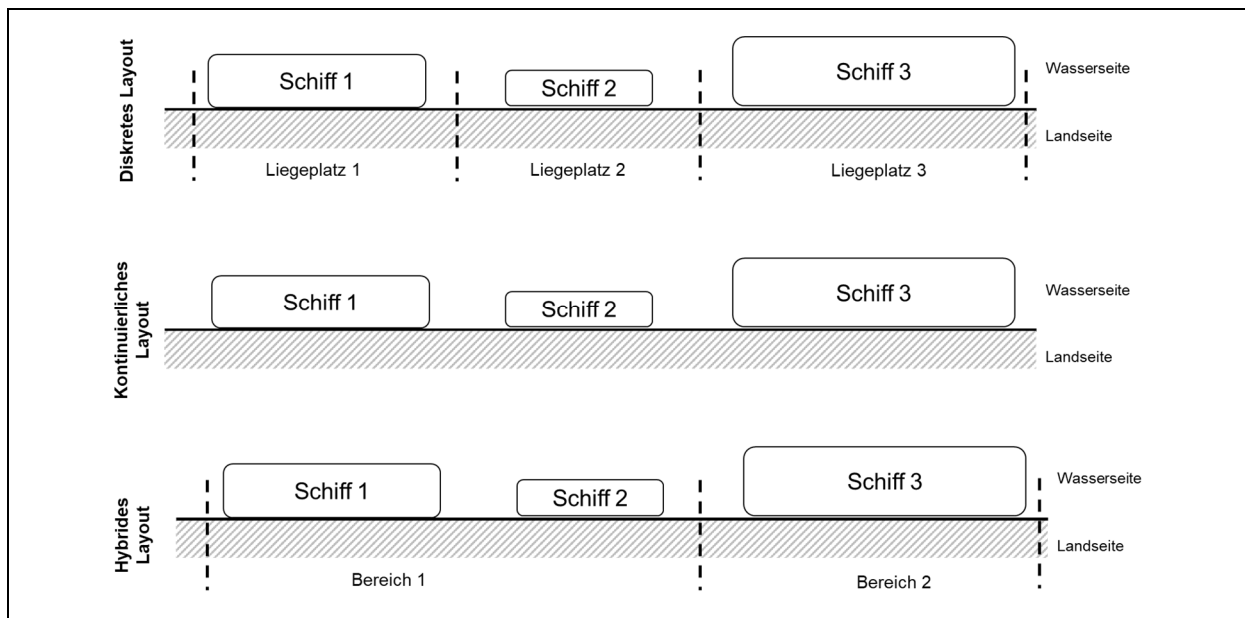
**Abbildung 22: Zuordnung von Aufgaben nach (Fischer und Gehring, 2005)**

Somit haben die Allokationsentscheidungen eine direkte Auswirkung auf die Terminalproduktivität. Wie in anderen Lagerhaltungssystemen auch, führt die Lagerallokation durch die mit den Waren verbundene Lagerdauer zu direkten zeitlichen Abhängigkeiten, indem wegen begrenzter Lagerkapazitäten Flächen temporär belegt und nicht für weitere Planungen zur Verfügung stehen. Somit hat die planerische Verteilung von Fahrzeugvolumen einen hohen Stellenwert für alle Folgeplanungen (Haubrich, 2017).

Eng verbunden mit diesem raumzeitlichen Zuordnungsproblem ist die Planung der An- und Auslieferungspunkte (Haubrich, 2017). Hierzu zählen die Festlegung von Lkw-Anlieferungen, Bahnein- und Ausgängen sowie die Liegeplatzzuordnung von Schiffen. In der Regel sind Lkw-Anlieferungen aufgrund des Transportmediums so flexibel verortbar, dass keine langfristige Vorplanung vorgenommen wird. Vielmehr wird im Rahmen der operativen Planung situativ entschieden, wo entsprechende Anlieferungen und Abholungen erfolgen sollen (Schukraft et al., 2017). Hinsichtlich der Bahnanlieferungspunkte besteht aufgrund der Gleisinfrastruktur wenig Spielraum für Zuordnungsentscheidungen. Die Lokation der zu nutzenden Gleisanschlüsse wird vielmehr bereits im Rahmen der strategischen Planung festgelegt. In die taktische Planung werden somit vornehmlich der Fahrplan und verfügbaren Zeitslots der Gleisanlagen einbezogen, um die Personalkapazitäten festzulegen.

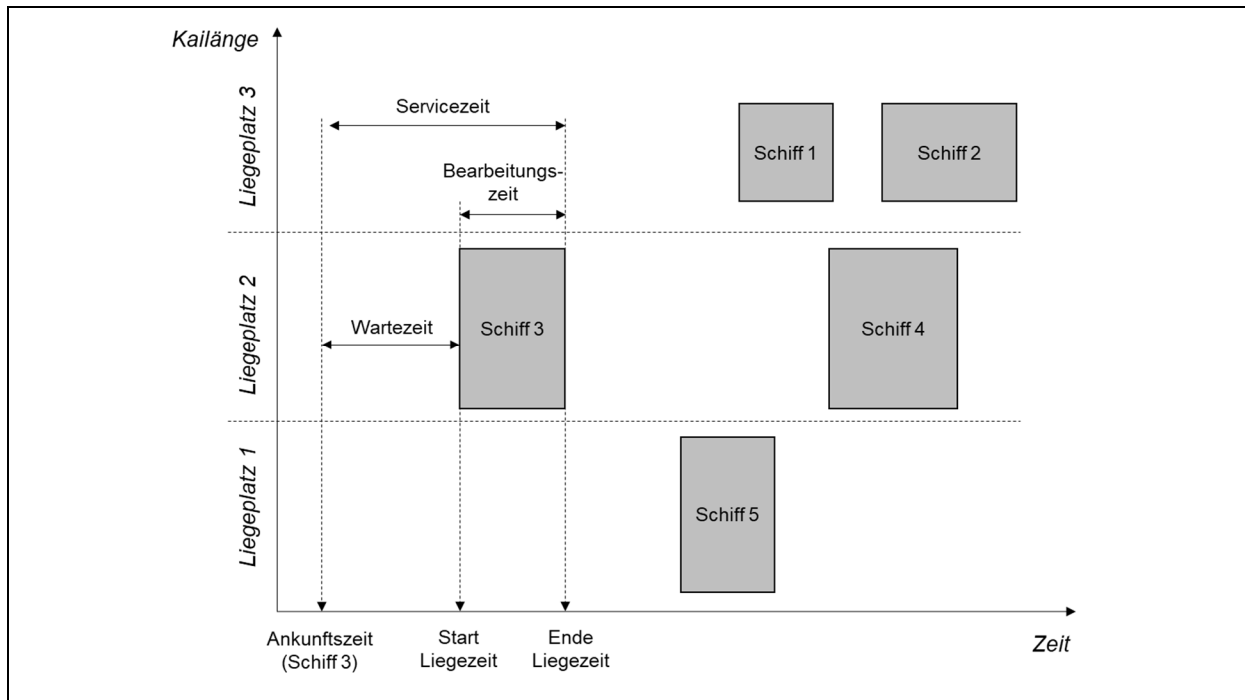
Hinsichtlich der Liegeplatzplanung besteht hingegen wie bei fast allen Hafensystemen ein hoher planerischer Freiheitsgrad. Somit nimmt die Liegeplatzplanung eine zentrale Rolle für die Gestaltung der Terminalproduktivität ein. Generell zielt die Liegeplatzplanung auf eine

möglichst effiziente Zuordnung von ankommenden Schiffen zu den vorhandenen Liegeplätzen. Hinsichtlich der Art des Zuordnungsproblems kann zwischen drei grundsätzlichen Ausprägungen unterschieden werden. Bei diskreten Layouts bestehen dedizierte Liegeplätze, welche einem bestimmten Teil der Kajenlinie zugeordnet sind (Buhrkal et al., 2011). Die Liegeplätze sind binär frei oder belegt. Die Größe der Schiffe ist hierbei nur als Nebenbedingung relevant. Im Gegensatz hierzu werden bei einem kontinuierlichen Layout Schiffe gemäß ihrer Länge bestimmten Kajenabschnitten zugeordnet (Mauri et al., 2016). Durch raumzeitliche Verschiebungen sollen bei kontinuierlichen Kajenlayouts möglichst hohe Auslastungen der Kajenbereiche erzielt werden. In hybriden Layouts bestehen, ähnlich wie bei den diskreten Layouts, klar definierte Liegeplatzbereiche. Diese dürfen allerdings durch die Planung verletzt werden (z.B. ein Schiff liegt in zwei Segmenten oder zwei Schiffe teilen sich ein Segment) (Kordić et al., 2016). Die folgende Abbildung 23 zeigt diese Liegeplatztypen im Vergleich. Für Automobilterminals können alle Ausprägungsformen gewählt werden.



**Abbildung 23: Liegeplatzlayouts nach (Ma et al., 2019)**

Unabhängig von dem Liegeplatzlayout zielt die Liegeplatzplanung auf die Lösung eines einheitlichen Grundproblems. Hierbei spielt die Liegeplatzart als mögliche hafenspezifische Nebenbedingung in den Lösungsansatz hinein. Auch infrastrukturelle Gegebenheiten wie beispielsweise die Verfügbarkeit von Kränen zur Be- und Entladung können als relevante Nebenbedingung herangezogen werden (Chang et al., 2010; Bierwirth und Meisel, 2015). Die Abbildung 24 zeigt das Grundproblem der Liegeplatzzuordnung als raumzeitliches Koordinierungsproblem, bei dem je Lösungspräferenz die Liegezeit der Schiffe (von Ankunft bis Abfahrt), die Wartezeit der Schiffe, die Servicezeit der Schiffe oder die Auslastung der Kajen optimiert werden soll.



**Abbildung 24: Grundproblem der Liegeplatzplanung (Buhrkal et al., 2011)**

Durch die verschiedenen möglichen Zielfunktionen und die spezifischen Anforderungen für verschiedene Hafentypen existiert eine Vielzahl verschiedener Lösungsansätze für die Liegeplatzplanung. Insbesondere für den Bereich der Containerterminals existieren viele spezialisierte Ansätze, welche weitere Rahmenbedingungen adressieren. Häufig berücksichtigen die Berechnungsmodelle für Containerterminals Restriktionen für die verfügbaren Krankapazitäten und die spätere Anordnung von Containern in den Lagerblöcken (Voß et al., 2004; Stahlbock und Voß, 2007).

Für Automobilterminals schlägt Mattfeld (2006) einen analytischen Ansatz vor, welcher die bekannten Eingangs- und Lagerpunkte berücksichtigt. Durch Finden eines gerichteten Graphs, der die raumzeitlichen Kaje restriktionen einhält, sollen die Fahrtbewegungen von und zum Schiff möglichst kurz gehalten werden (Mattfeld, 2006). Auch Dkhil et al. (2021) beschrieben einen Ansatz, welcher eine Liegeplatzvorplanung mittels einer linearen Programmierung vornimmt (Dkhil et al., 2021). Ebenfalls wird, wie durch Mattfeld vorgeschlagen, in der Optimierung versucht, die Produktivität anhand der bekannten Stellplätze durch möglichst sinnvolle Liegeplatzzuordnung zu ermöglichen.

Somit ist auf taktischer Ebene die Liegeplatzplanung ein wichtiges Instrument, um einen effizienten Umschlag vorzubereiten. Durch eine geschickte Liegeplatzwahl können sowohl Fahrwege von Schiffen zu Importflächen als auch Wege zwischen Exportflächen und abgehenden Schiffen verkürzt werden (Haubrich, 2017; Schukraft et al., 2017). Hierbei fokussieren die Liegeplatzplanungs-Ansätze für Automobilterminals darauf, die Liegeplatz-

---

Allokation auf der Grundlage der bekannten und später erwarteten Stellplätze zu optimieren und diese daran auszurichten. Die genannten Ansätze für den Bereich der Automobilterminals verdeutlichen und bestätigen die in der Arbeitshypothese beschriebenen Interdependenzen zwischen den Planungsschritten.

### 2.5.5 Operative Planung

Die operative Planung wird in der Regel unmittelbar vor der Ausführung der physischen Prozesse durchgeführt. Zu diesem Zeitpunkt liegen zunehmend gesicherte Informationen hinsichtlich aller Prozessvolumen und der damit verbundenen Planzeiten vor, welche beispielsweise für eine Festlegung der Liegeplätze oder eine Zuweisung von Lkw-Ladestellen genutzt werden. In diesem Planungsschritt werden die Ergebnisse der zeitlich vorhergegangenen kaskadierten Planungsschritte mit der zu erwartenden Situation abgeglichen. Auf dieser Grundlage werden die bestehenden Pläne entweder bestätigt oder bei Bedarf auf veränderte Situation angepasst. Ein leicht verständliches Beispiel kann hierbei der Liegeplatzplanung entnommen werden. Sollten beispielsweise durch Prozessverzögerungen Liegeplätze länger belegt sein, werden (wie in der Abbildung 20 dargestellt), zeitliche Liegeplatzüberschneidungen gelöst, in dem alternative Kajeplätze gesucht werden. Das Vorgehen unterliegt hierbei den unter 2.5.4 beschriebenen Prinzipien zur Liegeplatzplanung, indem möglichst kurze Routen zwischen den Liegeplätzen und den Lagerflächen gesucht werden. Wie bereits beschrieben, sind die Ansätze grundsätzlich vergleichbar mit der Liegeplatzplanung für andere Terminaltypen (z.B. Stückgut oder Containerterminals). Sie zielen neben der konkreten Liegeplatzzuordnung auf möglichst kurze Liegezeiten sowie eine hohe Produktivität bei der Be- und Entladung ab (Mattfeld, 2006; Bierwirth und Meisel, 2015). Das gewählte Beispiel von Liegeplatzverschiebungen während der operativen Planungsphase illustriert die vielen Freiheitsgrade, die dieser Phase inhärent sind: Während die Stellplätze für ausgehende Exportvolumen durch die bereits vorhandenen Fahrzeuge festgelegt sind, können freie Lagerflächen für Importfahrzeuge auch theoretisch kurz vor Prozessbeginn angepasst werden, um kürzere Routen (wie im Beispiel der Liegeplatzverschiebung) zu realisieren.

Generell greifen in der operativen Planung alle kaskadierten Planungsschritte ineinander und müssen folglich aufeinander abgestimmt werden. Aus planerisch-logischer Sicht sind somit alle Problemstellungen, die mit den in Abbildung 20 dargestellten Prozessen auf der Ausführungsebene durch die operative Planung durch ein integratives Planungsergebnis zu beantworten: die Allokationsentscheidungen für ankommende Fahrzeugvolumen, Allokationsentscheidungen für Vor- und Nachstaflächen Anzahl und Richtung der terminalinternen Umfuhren zu Technikbearbeitungen, Kapazitäts- und Mengenplanung der

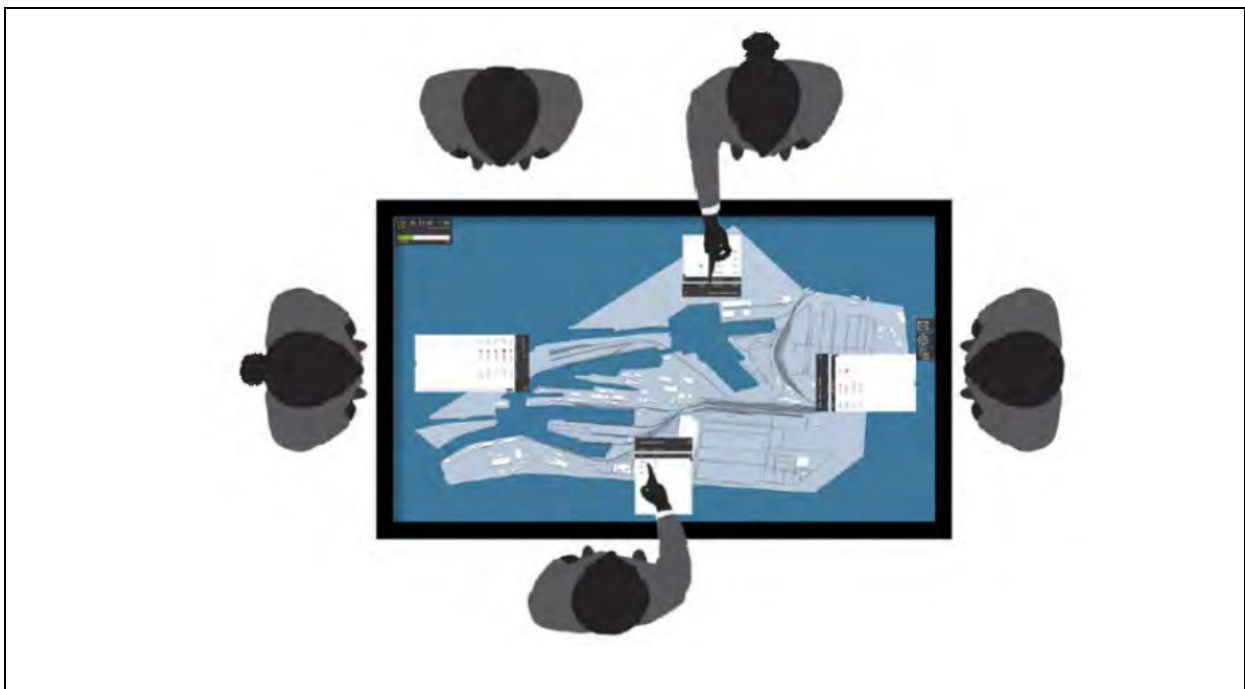
---

Technikstationen, Festlegen von Liegeplätzen und Laderampen zu den jeweiligen Verkehrsmitteln und letztlich die Verdichtung der Einzelpläne in Form einer Personalplanung (Mattfeld, 2006). In der Regel übernehmen an Automobilterminals unterschiedliche Planer oder Planungsbereiche diese vielfältigen Aufgaben. Durch die bereits skizzierten Interdependenzen der einzelnen Planungsfragestellungen besteht ein großer Abstimmungsbedarf zwischen den einzelnen Planungsgewerken (Hoff-Hoffmeyer-Zlotnik et al., 2017; Görges und Freitag, 2019a).

Für die Bewältigung des hohen Abstimmungsbedarfs werden daher planerische Werkzeuge benötigt, welche integrativ die zugrundeliegenden Terminalplanungsprobleme lösen können oder kollaborative planerische Entscheidungen durch interaktive Planungsansätze unterstützen (Dorndorf und Kneis, 2014; Haubrich, 2017; Hoff-Hoffmeyer-Zlotnik et al., 2020a). Für Automobilterminals schlägt die Literatur verschiedene Ansätze für eine Kopplung von operativer Flächen- und Stellplatzplanung mit der Personal- und Ressourcenplanung vor (Mattfeld und Kopfer, 2003; Fischer und Gehring, 2005). Die rein integrative Betrachtung von Planungsproblemen kann einerseits zur Verbesserung der Gesamtzieelerreichung beitragen und somit den Anforderungen der Interdependenzen genügen. Allerdings sind hinsichtlich des Einflusses auf kurzfristige dynamische Veränderungen insbesondere integrative Planungsansätze anfällig (Framinan und Ruiz, 2010). Als mögliche Folge von regelmäßigen Umplanungen, als Antwort des Planungssystems auf veränderte informatorische Rahmenbedingungen, wird die sogenannte Plannervosität beschrieben, welche im produktionslogistischen Kontext ein bekanntes Phänomen ist (z.B. (Tolio et al., 2011), (Pujawan, 2004)). Die Optimierung führt in diesen Fällen, gemessen an den Zielgrößen, zu einer der neuen Situation verbesserten und somit adäquaten Problemlösung. Hierbei werden allerdings die bestehenden Pläne stark unter raumzeitlichen Allokationsaspekten verändert. Speziell bei hochintegrierten Planungsmodellen können hierdurch teilweise wechselseitige Abhängigkeiten nicht eingehalten werden oder Pläne werden so stark verändert, dass sie zu weiteren negativen Auswirkungen von benachbarten nicht integrierten Planungen führen. Ansätze wie die robuste Planung sollen diesen Auswirkungen von Neuplanungen bereits konzeptionell entgegenwirken (z.B. (Gyulai et al., 2017)). Ein anderer eher praxisorientierter Ansatz ist die Einführung von sogenannten „frozen periods“ unmittelbar vor der Prozessdurchführung, in denen die automatische Planerstellung nicht mehr angestoßen wird. Durch manuelle Eingriffe von den planenden Personen können dennoch dedizierte Veränderungen der Planungen vorgenommen werden. Um innerhalb dieser Zeitfenster dennoch adäquat reagieren zu können, stellen insbesondere interaktive Planungsansätze, welche auch für Automobilterminals zum Einsatz kommen, ein vielversprechendes Werkzeug dar. Sie ermöglichen es den Planenden unmittelbar auf prozessuale Abweichungen zu reagieren und hierbei durch die direkte Interaktion mit anderen Planungsgewerken, die

---

Auswirkungen auf alle Terminalprozesse zu berücksichtigen. Durch die durchgehende Bereitstellung von Echtzeitinformationen, Echtzeitüberwachung und kontinuierliche Datenerhebung kann dieser Prozess maßgeblich unterstützt werden (M'hand et al., 2019). Wie bereits beschrieben bestehen hierbei zwischen den Planungsgewerken starke wechselseitige Abhängigkeiten und hoher Abstimmungsbedarf. Im Kontext von Automobilterminals der Umgang mit diesen Abhängigkeiten durch neue Mensch-Technik-Schnittstellen unterstützt werden. Hoff-Hoffmeyer–Zlotnik et al. (2020) stellen ein interaktives Multitouch-Planungssystem vor, welches einerseits die für alle Planer relevanten Informationen bereitstellt und über geeignete Visualisierungs- und Interaktionsmechanismen eine Abstimmung der Planer untereinander und direkte systemische Eingriffsmöglichkeiten eröffnet. Die folgende Abbildung 25 zeigt exemplarisch die Zusammenarbeit und die Interaktion mehrerer Planer an einem Multitouchtisch.



**Abbildung 25: Zusammenarbeit von Planern an einem Multitouchtisch (Hoff-Hoffmeyer-Zlotnik et al., 2020a)**

Durch die situative Bereitstellung von aktuellen systemischen Informationen können die Planer gemeinschaftlich Entscheidungen treffen. Die Auswirkungen können im direkten Austausch erörtert und gemeinsam getragen werden. Durch die digitale Oberfläche werden die Plananpassungen direkt umgesetzt.

Den Übergang zur Prozessdurchführung markiert die Prozesssteuerung. Sie ist vergleichbar mit der Auftragsfreigabe in klassischen PPS-Systemen, indem die Vorplanungen umgesetzt und bei Bedarf kurzfristig zur Laufzeit Eingriffe in die Prozesse ermöglicht werden. Die

---

Kontrolle des Arbeitsfortschritts ist eine der Kernaufgaben der Prozesssteuerung und dient der Erkennung von operativen Planabweichungen (Böse, 2012).

### 2.5.6 Validierung der Arbeitshypothesen und Ableiten des Lösungsbedarfs

Zu Beginn dieser Arbeit wurden zwei grundlegende Arbeitshypothesen formuliert. Diese sind im Rahmen des gewählten SE-Vorgehensmodells als Anstoß für die Phase der Vorstudie zu verstehen. Um die Vorstudienphase erfolgreich zu durchlaufen, ist ein positiver Nachweis dieser Hypothesen notwendig. Wie eingangs beschrieben ist auch die erste der vier forschungsleitenden Fragestellungen eng mit diesen Hypothesen verbunden und soll in diesem Zuge beantwortet werden.

Die erste Arbeitshypothese postulierte, dass der klassische kaskadierte Planungsprozess aufgrund von strukturell inhärenten Eigenschaften eine systemische zeitliche Inflexibilität ausweist. Gemäß der Hypothese ist diese Inflexibilität eine grundsätzliche Eigenschaft von Terminals, welche durch einen klassischen temporal kaskadierten Planungsprozess geplant und gesteuert werden. Die vorstehenden Analysen zum Stand der Technik in den Kapiteln 2.5.1 bis 2.5.5 bestätigen diese Arbeitshypothese. Die klassischen Planungsprozesse sind klar nach temporalen und inhaltlichen Aspekten voneinander getrennt. Hierbei werden die Pläne sukzessive nacheinander erstellt und bilden jeweils die Ausgangslage für den folgenden Planungsschritt (vgl. Abbildung 20). Auch haben die vorstehenden Analysen die dominierende Rolle der Flächenmasterplanung als das entsprechende Versatzstück, welches die Allokation von Fahrzeugen zu Flächen determiniert und somit die Basis für die Folgeplanungen ist, herausgearbeitet. Die Ausführungen zeigen, dass die beschriebene zeitliche Inflexibilität zwei Dimensionen (kundenauftragsneutral und kundenauftragsspezifisch) hat. Aufgrund von unvollständigen Informationen, vornehmlich bedingt durch die Position der Terminals in der automobilen Supply Chain (siehe 2.5.1), müssen Planungsschritte kundenauftragsneutral durchlaufen werden. Die Ausführung dieser Planungsentscheidungen beeinflusst wiederum die späteren Planungsentscheidungen desselben Planungsschritts (z.B. durch Belegung von Flächen). Mit dem Eingang der Kundeninformationen (u.a. Zuordnung von konkreten Fahrzeugen zu bestimmten Schiffsreisen) vervollständigt sich das planerische Bild. In der Rückschau könnten theoretisch oftmals deutliche Planungsverbesserungen generiert werden. Die Umsetzung dieser veränderten Pläne ist jedoch nicht sinnvoll möglich, da die Fahrzeuge bereits in den geplanten Lagerflächen abgestellt wurden und folglich mit großem Aufwand umgefahren werden müssten. Somit bestätigen die vorstehenden Ausführungen und die Analyse der klassischen Planungsprozesse die Annahmen der ersten Arbeitshypothese. In engem Zusammenhang hierzu ist die zweite Arbeitshypothese zu sehen, welche einen starken Einfluss von externen Störgrößen auf den kaskadierten Planungsprozess vermutet. Durch die



---

beschriebene zeitliche Inflexibilität des Planungsprozesses amplifizieren sich die Wirkungen von externen Störungen auf den Gesamtprozess. Ein illustratives Beispiel hierfür bietet das Zusammenspiel von Flächenmasterplanung und der Liegeplatzplanung. So können unter anderem kleinste Abweichungen der Schiffsankünfte oder -abfahrten, welche z.B. witterungsbedingt auftreten können, über den kaskadierten Planungsprozess doppelt wirken: Offensichtlich wirkt die Verlängerung von Liegezeiten direkt auf die Allokationsentscheidungen für nachfolgende Schiffe, welche auf alternative Liegeplätze ausweichen müssten. Im Ergebnis werden längere Fahrstrecken als ursprünglich geplant realisiert. Mittelbar entstehen jedoch weitere produktivitätshemmende Effekte, indem einerseits freigehaltene Flächen für Importfahrzeuge nicht genutzt werden, bzw. belegte Flächen mit Exportfahrzeugen nicht frei werden. In der Folge müssen im Rahmen der operativen Steuerung Fahrzeugvolumina neu zugeteilt werden. Es entstehen zusätzliche Produktivitätsverluste durch einen verringerten Sortiergrad und weitere Fahrdistanzen für Fahrzeuge.

Somit können im Rahmen der Vorstudienphase dieser Arbeit die Arbeitshypothesen als valide Grundlage für die weitere Bearbeitung der forschungsleitenden Fragestellungen angesehen werden. Neben der Überprüfung dieser Hypothesen verfolgt das deskriptive Ziel dieser Arbeit weiterhin die Klärung und Abgrenzung der relevanten Begriffe und die Schaffung eines theoretischen Fundaments für die Erarbeitung eines geeigneten Ansatzes zur Überwindung der erkannten Schwachstellen im Planungsprozess. Daher werden im Folgenden Ansätze aus anderen Diskursbereichen der Logistik, welche eine flexible Planung unter unsicheren Rahmenbedingungen ermöglichen, näher betrachtet. Ziel dieser Betrachtung ist, im Zuge des deskriptiven Ziels dieser Arbeit, Ansätze zu identifizieren, welche potenziell die zeitliche Inflexibilität des Planungsprozesses aufzulösen und den Effekt von externen Stördynamiken zu verringern vermögen.

Auf dieser Grundlage sollen Bedarfe für den gesamten Planungsprozess von Automobilterminals abgeleitet werden. Eine Stoßrichtung, um die Planungsleistung zu verbessern, ist die Schaffung einer stärkeren Informationsintegration in der Supply Chain, ähnlich wie es Vilkelis und Jakovlev (2013) vorschlagen. Eine frühere Verfügbarkeit von kundenauftragsbezogenen Informationen kann die Planungsleistung unterstützen. Wie bereits dargelegt, ist jedoch der Übergang von kundenauftragsneutralen zu kundenauftragsbezogenen Daten und der hiermit einhergehende zeitliche Versatz der Supply Chain inhärent (Vilkelis und Jakovlev, 2013). Eine Verkürzung könnte folglich die Problemsymptome verringern, aber nicht auflösen. Daher ist die zweite Lösungsstoßrichtung die Veränderung des kaskadierten Planungsprozesses.

---

## 2.6 Selbststeuernde logistische Prozesse

Die vorstehende Analyse verdeutlicht, dass der kaskadierte Planungsprozess und die spätere Prozessausführung stark voneinander abhängig ist und die einzelnen Ergebnisse aufeinander aufbauen. Durch die temporalen Abhängigkeiten ist, wie aufgezeigt, das gesamte Planungssystem negativ sensibel für volatile Schwankungen von Eingangsgrößen und zufällig auftretenden Störungen. Für den speziellen Fall von Automobilterminals wurde gezeigt, dass diese Eigenschaft dem Planungssystem aufgrund der temporalen Abhängigkeiten inhärent ist. Vergleichbare Abhängigkeiten wurden in der Vergangenheit auch in anderen logistischen Systemen erkannt und der Bedarf nach Planungs- und Steuerungsansätzen, welche insbesondere auf dynamische Einflussgrößen reagieren können, postuliert (Delfmann et al., 2018). Im Bereich der Produktionslogistik wurden verschiedene Ansätze mit dem Ziel des Umgangs mit Dynamik und Unsicherheiten entwickelt. Generell zielen die klassischen Ansätze der reaktiven und der robusten Planung darauf ab, die Wirkung von möglichen dynamischen Störgrößen (z.B. Maschinenausfälle oder Eilaufträge) und die hieraus resultierenden Planabweichungen möglichst gering zu halten, indem dynamische Störeinflüsse bereits in der Planungsphase berücksichtigt oder die bestehenden Pläne den sich ändernden Rahmenbedingungen angepasst werden (Pinedo, 2016). Unterschieden werden kann zwischen prädikativen, reaktiven, prädikativen/reaktiven und proaktiven Ansätzen (van Brackel, 2009)(Chaari et al., 2014). Klassische zentrale Planungsansätze, welche regelbasiert oder heuristisch ein Plan a priori erstellen und anschließend im System operativ umsetzen, werden der Gruppe der reaktiven Planung zugerechnet werden, da sie auch für spätere Neuplanungen (Resheduling) herangezogen werden können (Chaari et al., 2014). Sie sind dennoch von den klassischen rein reaktiven Verfahren zu unterscheiden, welche auf die Erstellung eines Plans verzichten und eine Zuordnung von Aufträgen zu Systemressourcen, beispielsweise anhand definierter Prioritätsregeln, vornehmen (Pinedo, 2016). Im Gegensatz hierzu zielen proaktive Ansätze darauf ab, unsichere und dynamische Ereignisse bereits im Vorfeld in die Planerstellung einzubeziehen. Hierdurch sollen die generierten Pläne eine gewisse Robustheit gegenüber dynamischen Einflussgrößen erlangen und somit während der Planausführung möglichst geringe Abweichungen vom ursprünglichen Plan entstehen lassen (Leon et al., 1994; Aytug et al., 2005). Die gewünschte Robustheit von Produktionsplänen kann beispielsweise durch die bewusste Reservierung von Produktionskapazitäten für unerwartete Ereignisse erhöht werden (Mehta und Uzsoy, 1998; Goren und Sabuncuoglu, 2008). Aus methodischer Perspektive werden insbesondere Evolutionäre Algorithmen für die Erzeugung von robusten Plänen diskutiert (Jin und Sendhoff, 2003; Jin und Branke, 2005).

Prädikativ/reaktive Ansätze nehmen ebenso wie proaktiv-reaktive Ansätze eine Mittelstellung zwischen den vorgenannten Varianten ein. Sie beruhen auf dem Prinzip einer Planerstellung

---

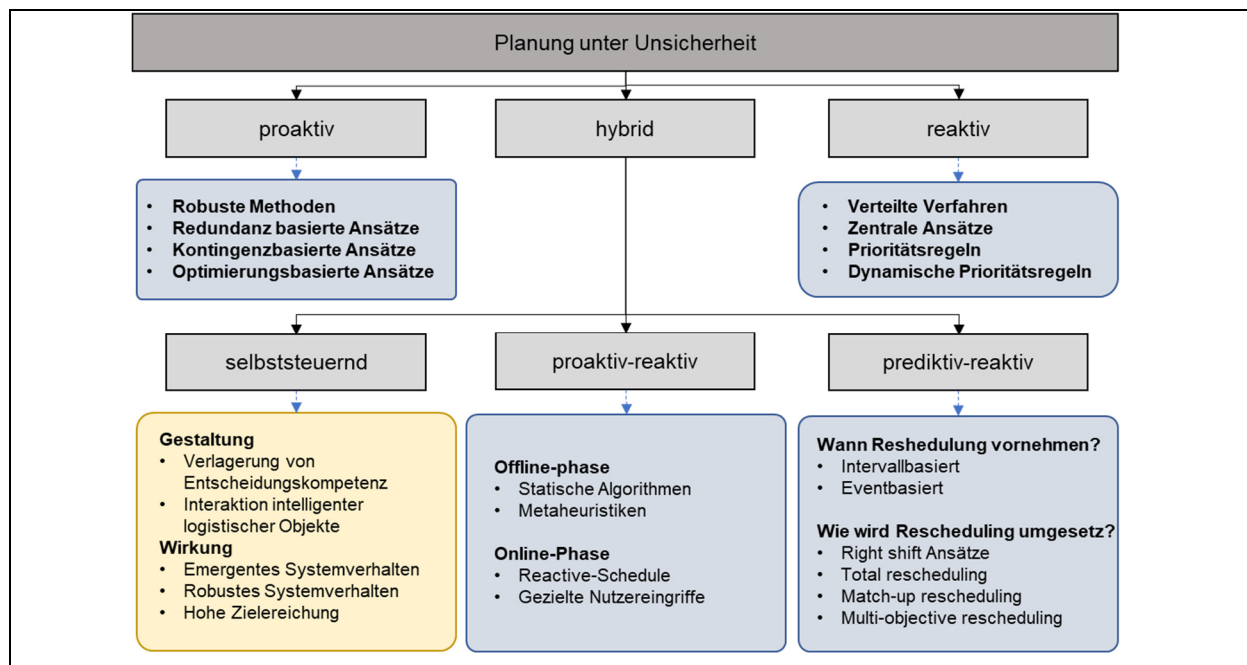
mit der Möglichkeit, während der Planausführung korrigierend einzugreifen (Vieira et al., 2003; van Brackel, 2009). Die prädikativen/reaktiven Ansätze zielen darauf ab, einen aktuell gültigen Plan durch entsprechende Veränderungen (Rescheduling) an die vorherrschende Situation zu adaptieren. Im Einzelnen kann hier zwischen korrektiven Verfahren (Reparaturverfahren), welche durch eine partielle Umstrukturierung des obsoleten Plans eine realisierbare Planvariante herbeiführen, und einer kompletten Neuplanung unterschieden werden (Vieira et al., 2003). Bei der Neuplanung wird der aktuelle Plan vollständig verworfen und ein neuer Plan auf Basis der veränderten Rahmenbedingungen generiert. Wie bereits erwähnt, werden üblicherweise im Zuge einer Neuplanung die statischen Planungsalgorithmen auf die neue Situation angewendet. Die führt einerseits zu einer sehr guten planerischen Anpassung an die neue Situation, impliziert aber andererseits häufig starke Abweichungen zwischen dem ursprünglichen und dem neuen Plan (Ouelhadj und Petrovic, 2009). Dieser Effekt wird als Plannervosität bezeichnet (Pujawan, 2004). Durch diese teils starken Abweichungen werden implizite planerische Interdependenzen (z.B. zur Produktionsprogrammplanung oder zur Materialbereitstellung oder -anlieferung) nicht ausreichend berücksichtigt. Hierdurch können weitere Eingriffe in die Planung notwendig werden, welche zu im Sinne der logistischen Zielerreichung ungünstigen Konstellationen führen (Tolio et al., 2011). Die Reparaturverfahren hingegen bergen ein geringeres Risiko für das Auftreten von Plannervosität, da diese Verfahren lediglich partielle Planänderungen propagieren. So werden, beispielsweise durch zeitliche Verschiebung von Aufträgen oder durch die partielle Neuplanung betroffener Aufträge und Ressourcen, obsolete Pläne variiert (Vieira et al., 2003). Die angeführten Ansätze haben ihren gedanklichen Ursprung in der Produktionslogistik. Sie können allerdings auch auf andere logistische Problemstellungen übertragen werden. So sind etwa reaktive Rescheduling-Ansätze auch für Planungsfragestellungen außerhalb der Produktionslogistik vielfältig, z.B. in der Bahnlogistik ((Josyula et al., 2018)) oder der Liegeplatzplanung (z.B. (Kim et al., 2021), (Lv et al., 2020)) anwendbar.

Reaktive und robuste Planungsansätze nehmen eine zentralistische und hierarchische Perspektive auf das zu betrachtende System ein. Ein Gegenentwurf stellt das Konzept der lokalen, autonomen Steuerung dar, welches die Bewältigung von internen und externen Störgrößen und daraus resultierenden, unerwünschten Systemdynamiken und Planabweichungen mit einer dezentralen Verteilung von Entscheidungskompetenzen verfolgt. Die Selbststeuerung logistischer Prozesse, hat ihre gedanklichen Ursprünge in der Selbstorganisation von Systemen. Sie zielt auf eine zielgerichtete Beeinflussung des Systemverhaltens durch das Zusammenspiel dieser lokal verteilten Entscheidungen (Mueller et al., 2019). Das Konzept der Selbststeuerung ist ebenfalls nicht auf einen speziellen logistischen Teilbereich beschränkt, sondern ist grundsätzlich in logistischen Systemen einsetzbar. Folglich beschreibt dieser Ansatz die Idee der Schaffung von dezentralen

Entscheidungsstrukturen innerhalb eines logistischen Systems. Die Entscheidungsfindung wird konzeptgemäß auf die Ebene der interagierenden Systemelemente verschoben. Durch die autonome Entscheidungsfindung der Systemelemente wird das Ziel verfolgt, eine höhere Gesamtsystemrobustheit, positive Emergenz und einen flexiblen Umgang mit der Komplexität und der Dynamik des Systems zu erzeugen (Böse und Windt, 2007; Beer, 2008). Die folgende Definition setzt verdichtet diese Merkmale in Beziehung und liegt dem Begriffsverständnis in der weiteren Ausarbeitung zugrunde.

„Selbststeuerung beschreibt Prozesse dezentraler Entscheidungsfindung in heterarchischen Strukturen. Sie setzt voraus, dass interagierende Elemente in nicht-deterministischen Systemen die Fähigkeit und Möglichkeit zum autonomen Treffen von Entscheidungen besitzen. Ziel des Einsatzes von Selbststeuerung ist eine höhere Robustheit und positive Emergenz des Gesamtsystems durch eine verteilte, flexible Bewältigung von Dynamik und Komplexität.“ (Windt und Hülsmann, 2007)

Die detaillierte Differenzierung der Methoden zur Planung unter Unsicherheit dient an dieser Stelle der systematischen Auswahl eines geeigneten Lösungsansatzes, gemäß dem deskriptiven Ziel dieser Arbeit. Daher fasst die folgende Abbildung 26 die genannten Ansätze und Verfahren zusammen und setzt sie logisch zueinander in Relation.



**Abbildung 26: Taxonomie Planungsverfahren unter Berücksichtigung von Unsicherheit in Anlehnung an (Chari et al., 2014)**

Ergänzend zur Darstellung von Chari et al, wurde die Abbildung 26 um den Aspekt der Selbststeuerung ergänzt (Chari et al., 2014). Zwar ist der Fokus von Selbststeuerung weiter

---

als die ausschließliche Handhabung von planerischen Unsicherheiten zu fassen, dennoch soll an dieser Stelle zunächst dieser Aspekt für die argumentatorische Vorauswahl von geeigneten Funktionsprinzipien fokussiert werden.

Die detaillierte Betrachtung der Planungsprozesse und der des abgeleiteten Handlungsbedarfs zeigen, dass die Dynamik und Komplexität des Systems Automobilterminal weitere Dimensionen als nur Unsicherheit umfassen. Insbesondere die temporale Abhängigkeit der kaskadierten Planungsprozesse führt per se zu komplexen dynamischen Systemverhalten, welches wegen der unvollständigen Planungsinformationen schwer durch einen reinen Optimierungsansatz abzudecken ist. In diesem Zusammenhang kommt eine weitere Stärke von selbststeuernden logistischen Prozessen zum Tragen, da diese konzeptionsgemäß keine vollständigen Informationen über zukünftige Systemzustände benötigen. Durch diese konzeptionelle Ausrichtung scheinen selbststeuernde Prozesse besonders für das Anwendungsfeld der Automobilterminals geeignet zu sein. Um im Rahmen des praktischen Ziels dieser Arbeit eine sinnvolle Methode auswählen zu können, wird im Folgenden auf die Kernelemente der oben genannten Definition eingegangen und entsprechende Methoden voneinander abgegrenzt.

### 2.6.1 Selbststeuernde logistische Objekte

Ein zentrales Element der Selbststeuerungsdefinition ist die Interaktion von intelligenten logistischen Objekten. Hierbei ist der Begriff des intelligenten logistischen Objekts sehr weit zu fassen. Er kann sowohl materielle (z.B. Werkstücke oder Maschinen) als auch immaterielle Objekte (z.B. Produktionsaufträge) umfassen (Scholz-Reiter et al., 2010). Sie stehen bei der Gestaltung von Selbststeuerungsmethoden im Fokus. Konzeptionell werden diese intelligenten logistischen Objekte durch die Möglichkeit, Informationen zu sammeln, auszuwerten, Entscheidungen zu treffen und mit anderen Systembestandteilen zu kommunizieren, definiert. Folglich sind diese Aspekte bei der Gestaltung von besonderer Bedeutung. Lewin und Fey (2018) haben eine Taxonomie entwickelt, welche die Eigenschaften von intelligenten logistischen Objekten beschreibt. Die folgende Abbildung 27 zeigt diese Taxonomie. Hierbei sind insbesondere die Fähigkeiten zu kommunizieren, Informationen zu erheben und zu verarbeiten sowie eine eindeutige Identifizierbarkeit allen intelligenten logistischen Objekten gemein. Auch Wind und Hülsmann (2007) beschreiben ähnliche Eigenschaften von intelligenten logistischen Objekten. Durch die Kombination dieser Fähigkeiten werden logistische Objekte in die Lage versetzt, in definierten Rahmen Umgebungsinformationen zu sammeln, diese zu verarbeiten und entsprechende Entscheidungen lokal zu treffen und diese entsprechend umzusetzen. Lewin und Fey (2018) richten die Eigenschaftszuschreibung stark auf physische Objekte aus. Der Begriff intelligentes

logistisches Objekt, wie er in dieser Arbeit verwendet wird, ist allerdings weiter gefasst und schließt auch immaterielle Objekte, wie beispielsweise Arbeits- oder Transportaufträge, mit ein.

Architekturelemente \ generische Funktion	Identifizierbarkeit	Lokalisierbarkeit	Speicher Objektinformationen	Überwachung / Monitoring	Kommunikationsfähigkeit	Automatische Transaktion	Aktion
Identifikator	●	○	○	○	○	○	○
Kommunikationsschnittstelle	○	●	○	○	●	●	●
Informationsspeicherung	○	○	●	●	○	●	●
Informationsverarbeitung	○	○	○	◐	○	●	●
Sensorik	◐	◐	○	●	○	○	○
Aktorik	○	○	○	○	○	◐	◐
Energieversorgung	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐

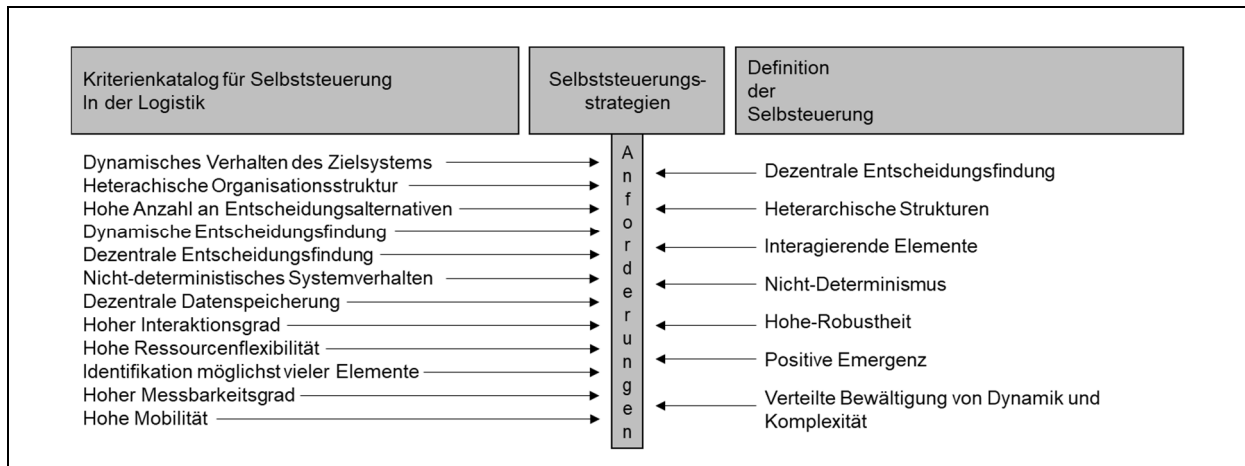
Legende: ● benötigt  
◐ teilweise benötigt

**Abbildung 27: Charakteristika von intelligenten logistischen Objekten (Lewin und Fay, 2018)**

Die in der Abbildung 27 aufgezeigten Mindestanforderungen haben auch im Fall von immateriellen Objekten Bestand. Jedoch bedürfen Sie systemischen Äquivalenten, welche die entscheidungsleitenden Eigenschaften aufweisen und über entsprechende Kommunikationsschnittstellen mit den anderen intelligenten logistischen Objekten in Austausch treten können.

## 2.6.2 Selbststeuerungsmethoden

Den Kern von selbststeuernden logistischen Prozessen stellen insbesondere die Art und die Gestaltung der lokalen Steuerungsentscheidungen der intelligenten logistischen Objekte dar. In der Literatur kann eine Vielzahl verschiedener selbststeuernder Entscheidungsmechanismen gefunden werden, welche sich auf verschiedenen Ebenen deutlich voneinander unterscheiden. Die folgende Abbildung 28 zeigt eine zusammenfassende Übersicht von Anforderungen, welche an eine Selbststeuerungsmethode aus rein definitorischer Sicht gestellt werden können.



**Abbildung 28: Anforderungen an Selbststeuerungsstrategien (Scholz-Reiter et al., 2011b)**

Auf einer allgemeinen Ebene treffen diese Anforderungen auf die Methoden grundsätzlich zu, sie erlauben jedoch keine klare Charakterisierung. In diesem Zusammenhang haben Windt et al. (Windt et al., 2010) in einer Analyse umfassend existierende Selbststeuerungsmethoden identifiziert und diese anschließend in Cluster anhand der zugrundeliegenden Wirkmuster zusammengefasst. Mittels Simulationen konnten Wirksamkeit und Wirkungsweisen innerhalb der Cluster nachgewiesen werden (Windt et al., 2010). Da die gefundenen Cluster nicht vollständig disjunkt sind, wird im Rahmen dieser Arbeit auf ein Klassifikationsschema auf der Basis von Grundstein et al. (2015) und Scholz-Reiter et al. (2010) zurückgegriffen (Scholz-Reiter et al., 2010; Grundstein et al., 2015). Gemäß dieser Klassifikation lassen sich Selbststeuerungsstrategien bezüglich des Orts der Informationsgewinnung und der Entscheidungsrationale differenzieren. Einerseits existieren Methoden, welche rein auf der Grundlage von lokal verfügbaren Informationen eine Entscheidungsfindung ermöglichen. Demgegenüber stehen Methoden, welche zunächst die relevanten Informationen aus dem System explorieren und anschließend lokale Entscheidungen forcieren. Die zweite vorgeschlagene Dimension für die Klassifikation ist die Art der Entscheidungsrationale. Hierbei ermöglichen „rationale Methoden“ Entscheidungen, welche direkt im sachlogischen Zusammenhang des Systemziels zu sehen sind (z.B. die Auswahl einer Entscheidungsalternative anhand der verfügbaren Warteschlangenlänge). Dem entgegen stehen die „gebunden rationalen Methoden“. Entscheidungen intelligenter logistischer Objekte stehen bei diesen Methoden nur indirekt (gebunden) mit dem Systemzweck in Verbindung. Gebunden rationale Verfahren zielen darauf ab, beobachtetes emergentes Systemverhalten aus anderen Systemen auf das logistische System zu übertragen. Hierzu zählen beispielsweise pheromon-basierte Ansätze (Armbruster et al., 2006; Beer, 2008) oder Bienenalgorithmen (Scholz-Reiter et al., 2008b), die das Nahrungssuchverhalten von Ameisen oder Bienen als Grundlage haben. In solchen Systemen entscheiden die intelligenten logistischen Objekte nicht nach direkten rationalen Messgrößen, sondern nach künstlich

modellierten systemischen Entscheidungsgrößen, wie beispielsweise einer artifiziellen Pheromon-Konzentration. Hierbei schließt die Modellierung implizit die relevanten logistischen Zielgrößen mit ein, um das Systemverhalten in die gewünschte Richtung zu beeinflussen. Die folgende Tabelle 3 gibt einen Überblick über verschiedene existierende Selbststeuerungsmethoden und ordnet diese den entsprechenden Dimensionen zu.

**Tabelle 3: Klassifikation von Selbststeuerungsmethoden (Grundstein et al., 2015)**

Methodenart	Methode
Rationale Methoden	DLRP Produktion
	DLRP Transport
	Termin-treuemethode
	Gentelligen Parts
	Link-State internet routing protocol
	Warteschlangenvergleichsmethode
	One logistics target per rule
Gebunden rationale Methoden	Ameisen Algorithmen
	Bakterielle Chemotaxis
	Bienen Algorithmen
	Bionic manufacturing system
	Holonic manufacturing system
	Marktbasierte Steuerung

Bei der Betrachtung der Tabelle ist festzuhalten, dass sie nur eine Momentaufnahme bezüglich des existierenden Methodenportfolios darstellen kann. Die Entwicklung neuer Methoden und Ansätze ist generell denkbar. Grundsätzlich konnte in verschiedenen Studien nachgewiesen werden, dass die gewählten Selbststeuerungsmethoden die gewünschten Effekte hinsichtlich Systemleistung und Steigerung von Robustheit erzielen konnten. Die aktuelle Studienlage zeigt jedoch, dass nicht per se eine Methodenart einer anderen überlegen ist. Zwar konnten Vergleiche zwischen den Methoden am gleichen System zeigen, dass unter den jeweiligen Rahmenbedingungen situativ verschiedene Methodenklassen zu einer höheren Zielerreichung führen, jedoch scheint eine generalisierte Aussage nicht möglich. Vielmehr kann das Design einer Selbststeuerungsmethode eng an den jeweiligen Systemzweck gekoppelt angesehen werden. Scholz-Reiter et al. 2011 schlagen daher ein Vorgehensmodell zur zweckgerichteten Entwicklung von Selbststeuerungsmethoden vor, welches diesen Aspekt berücksichtigt (Scholz-Reiter et al., 2011b). Die folgende Abbildung 29 zeigt dieses Vorgehensmodell. Ausgehend von dem logistischen Anwendungsfall wird zunächst das Szenario erfasst und beschrieben. Auf dieser Grundlage können verschiedene Steuerungsmöglichkeiten und Freiheitsgrade abgeleitet werden (z.B. welche Elemente kommen für eine autonome Entscheidungsfindung in Betracht). In einem weiteren Schritt wird in einem kreativen Schaffensprozess ein mögliches Entscheidungsverhalten entwickelt und im nachfolgenden Schritt formal beschrieben sowie die benötigten Interaktionsmechanismen festgelegt.





---

Konzepte, welche die potenziellen Schwachstellen der zeitlichen Inflexibilität der klassischen Terminalplanung und ihrer Anfälligkeit gegenüber Störgrößen besser beherrschbar machen können. Hierin kann ein erfolgreicher Abschluss der Vorstudien-Phase des gewählten SE-Vorgehensmodells gesehen werden. Das definierte deskriptive Ziel wurde erfolgreich abgeschossen. Im Rahmen der Hauptstudienphase ist nun zu untersuchen, ob die unter 2.5.6 aufgezeigten Bedarfe nach einer inhaltlichen und zeitlichen Integration von Planungsschritten durch eine geeignete Selbststeuerungsmethode gedeckt werden können (Forschungsfrage 2) und ob hierdurch nachweislich die Systemleistungsfähigkeit gesteigert werden kann (Forschungsfrage 3).

### **3. Analyse eines exemplarischen Terminals**

Im Zuge der Hauptstudie soll die Entwicklung einer geeigneten Planungsmethodik auf Basis selbststeuernder Prozesse für den identifizierten Problembereich erfolgen. Um diese Entwicklung erfolgreich im Sinne der praxeologischen Relevanz vornehmen zu können, ist ein Fokuswechsel in der Hauptstudie notwendig. Die anhand der theoretischen Grundlagen gewonnenen Erkenntnisse aus Kapitel 2 zu den Schwachstellen und Entwicklungsbedarfen sollen weiter konkretisiert werden. Zu diesem Zweck soll ein exemplarisches Autoterminal herangezogen und im Detail analysiert werden. Insbesondere sollen die Planungsprozesse adressiert und nach den beschriebenen temporalen Abhängigkeiten untersucht werden. Zu diesem Zweck stellt das Kapitel 3.1 das Terminal vor und beschreibt seine strukturellen Basisparameter. Hierauf aufbauend, adressiert das Kapitel 3.2 die aktuellen Materialfluss- und Planungsprozesse. In Kapitel 3.3 werden die Prozesse quantitativ beleuchtet, um anschließend in dem Kapitel 3.4 eine Schwachstellen- und Potenzialanalyse vorzunehmen.

Abschließend werden Überlegungen vorgestellt, wie zu einem späteren Zeitpunkt der Studie sichergestellt werden kann, dass die an dem Beispiel gewonnenen Erkenntnisse möglichst verallgemeinerbar sind. Daher soll neben der systemischen Beschreibung des Beispielterminals zudem eine generalisierte Systembeschreibung vorgenommen werden, um die Übertragbarkeit auf andere Terminals sicherzustellen. In den Rahmen der Detailstudien in Kapitel 4 werden sowohl das real existierende Terminalbeispiel als eine generische Terminalsystembeschreibung aufgegriffen und die neuen Selbststeuerungsstrategien in Form von umfangreichen Simulationsstudien untersucht werden.

#### **3.1 Struktureller Aufbau des Beispielterminals**

Als archetypischer Vertreter wurde das Autoterminal Bremerhaven ausgewählt. Es ist sowohl aufgrund seiner räumlichen Ausdehnung und der zu beobachtenden Umschlagvolumina vergleichbar mit anderen internationalen Terminals. Verglichen mit internationalen Häfen wie

---

Seebrücke, Baltimore, Pyeongtaek oder Brunswick werden in Bremerhaven ähnliche Volumina bewegt (Automotive logistics, 2020). Durch seine Lage spielt es eine entscheidende Rolle für den Export der Fahrzeuge von deutschen Automobilherstellern und nimmt somit eine zentrale Rolle in den Lieferketten der deutschen Automobilindustrie ein. Auch für den Import von Fahrzeugen und ihrer Distribution im Inland ist das Terminal aus deutscher Perspektive von herausragender Bedeutung.

### 3.1.1 Flächen und Lagerung

Die Abbildung 30 zeigt das Autoterminal Bremerhaven in seiner vollständigen flächenmäßigen Ausdehnung auf einer Luftbildaufnahme. Hierbei umfasst das gesamte Terminalgelände eine Fläche von 240 ha. Das Terminal verfügt über entsprechende tiefseefähige Liegeplätze, Bahnrampen, Technikzentren und Bahnrampen für die Durchführung von Import und Exportprozessen. Deutlich zu erkennen sind die schleusengeschützten Liegeplätze und die Lagerflächen mit der charakteristischen Reihenaufstellung der Fahrzeuge. Ebenfalls sind verschiedene Parkregale, welche eine Lagerung von Fahrzeugen auf mehreren Ebenen erlauben, gut zu erkennen.



**Abbildung 30: Luftbild AutoTerminal Bremerhaven (BLG, 2019)**

Die folgende Aufstellung charakterisiert die relevanten infrastrukturellen Merkmale des Terminals (BLG, 2022):

- Lagerkapazität: 95.000 Pkw

- 
- Davon überdachte Lagerplätze (Hallen und Regale): 50.000 Pkw
  - Offene Stellfläche: 45.000 Pkw
  - Parkregale: 8
  - Liegeplätze: 18
  - Technikzentren: 3
  - Gleisanschlüsse & Kopframpen: 16

Die Fahrzeuglagerung erfolgt überwiegend in Reihenaufstellung. Lediglich für Auslieferungsprozesse werden Einzelplatzaufstellungen in Form von sogenannten Boxen- und Fischgrätenaufstellungen (vgl. 2.4.3) verwendet. Durch die Reihenaufstellung kann eine wesentlich stärkere Verdichtung in Abhängigkeit der gewählten Reihenlänge während der Lagerungsphase erfolgen (Mattfeld, 2006). Hierbei werden die Reihen und Einzelplätze, ähnlich wie bei Cordeau et al. (Cordeau et al., 2011) oder Böse (Böse, 2012) logisch in Blöcken angeordnet. Die Blöcke können wiederum zu Flächen und Bereichen weiter logisch aggregiert werden. Diese Aggregationsmöglichkeit erlaubt die Analyse des Lagerbestands auf verschiedenen Granularitätsebenen.

### 3.1.2 Gleisanschlüsse

Das Terminal besitzt insgesamt 16 Gleisanschlüsse, über welche mittels Kopframpen Fahrzeuge auf Züge be- und entladen werden können. Wie bereits unter 2.5 beschrieben, werden die Fahrzeuge auf der eigenen Achse bewegt. Das bedeutet, das Handling bei der Be- und Entladung wird von Terminalmitarbeitern vorgenommen, welche die Fahrzeuge fahren. Bei der Bahnlieferung handelt es sich üblicherweise um Exportfahrzeuge, welche pro Zug aus einem Herstellerwerk stammen und in verschiedene Destinationen versendet werden sollen. Fahrzeuge, die das Terminal per Bahn verlassen, sind meistens für den Import bestimmt. Diese Fahrzeuge wurden per Seeschiff angeliefert und werden für die weitere Verteilung in der Lieferkette via Bahn zu einem Lagerstandort in der Nähe der jeweiligen Zieldestinationen verbracht. Die genaue Beschreibung der Handlingsprozesse erfolgt unter Kapitel 3.2.

### 3.1.3 Liegeplätze und Kajen

Das Terminal verfügt über 18 ausgewiesene Kajenbereiche an denen RoRo-Carrier (deep-sea und short-sea) festmachen können. Diese nominelle Kajenkapazität richtet sich hierbei nach verschiedenen Schiffsparametern wie der Schiffsgröße, der Rampenpositionen der RoRo-Schiffe oder dem jeweiligen Schiffstiefgang. So könnte eine Kaje theoretisch für zwei kleinere

---

Feederschiffe gleichzeitig oder einen größeren Deep-Sea-Carrier genutzt werden (vgl. 2.5.4 - hybride Liegeplätze). Im Regelfall werden die Kajen allerdings als eigenständige, diskrete Liegeplätze geplant und systemisch verwaltet. Alle Kajen des exemplarischen Terminals sind durch Schleusen von der natürlichen Seeseite geschützt. Hierdurch können alle Schiffsoperationen tidenunabhängig vorgenommen werden. Es gibt keine zeitlichen Kapazitätseinschränkungen durch gezeitenbedingte Randsituationen (z.B. zu starke Rampensteigungen bei Ebbe und Flut). Daher wird die Kajenkapazität im Rahmen dieser Arbeit über die Zeit als konstant angesehen. Für diese Arbeit wird die terminalinterne Definition der Kajenverfügbarkeit übernommen. Hiernach können die ausgewiesenen Kajen lediglich ein RoRo-Schiff pro Zeit bearbeiten (diskrete Liegeplätze). Eine parallele Abfertigung von zwei Schiffen an einem Kajenbereich findet nicht statt. Aus diesem Grund können im Rahmen dieser Ausarbeitung insgesamt maximal 9 Schiffe parallel bearbeitet werden.

#### 3.1.4 Prozessausstattung

Für die Durchführung der Prozesse verfügt das Terminal über weitere Ausstattungen, wie beispielsweise Krane, Mobilkrane und Reachstacker (RS). Im Rahmen dieser Arbeit soll an dieser Stelle jedoch lediglich auf die für den Pkw-Umschlag relevanten Umschlagsmittel eingegangen werden. Gräte und Einrichtungen, welche für den Pkw-Umschlag genutzt werden, sind:

- Transfer-Shuttles
- Check-Schleusen und Scanner-Punkte
- MDE-Erfassungsgeräte

Die Shuttles werden genutzt, um die Mitarbeiter zu den jeweiligen Umschlags- und Fahrbewegungsprozessen zu transferieren. Üblicherweise werden auf Terminals Kleinbusse für diesen Zweck verwendet, um eine möglichst große Transferkapazität sicherzustellen. Die Checkschleusen und Scanner-Punkte sind feste Einrichtungen, welche die Fahrzeuge im Rahmen der Umschlagsbewegung durchfahren. Hier werden die Fahrzeuge auf etwaige Beschädigungen untersucht, im WMS-System vereinnahmt und die Fahrzeugbewegungen entsprechend verbucht. Mittels der MDE-Geräte können seitens des IT-Systems Schadenfälle protokolliert und dokumentiert werden. Weiterhin werden die MDE-Geräte genutzt, um Fahrbewegungen und die damit verbundenen Stellplatzveränderungen zu erfassen.

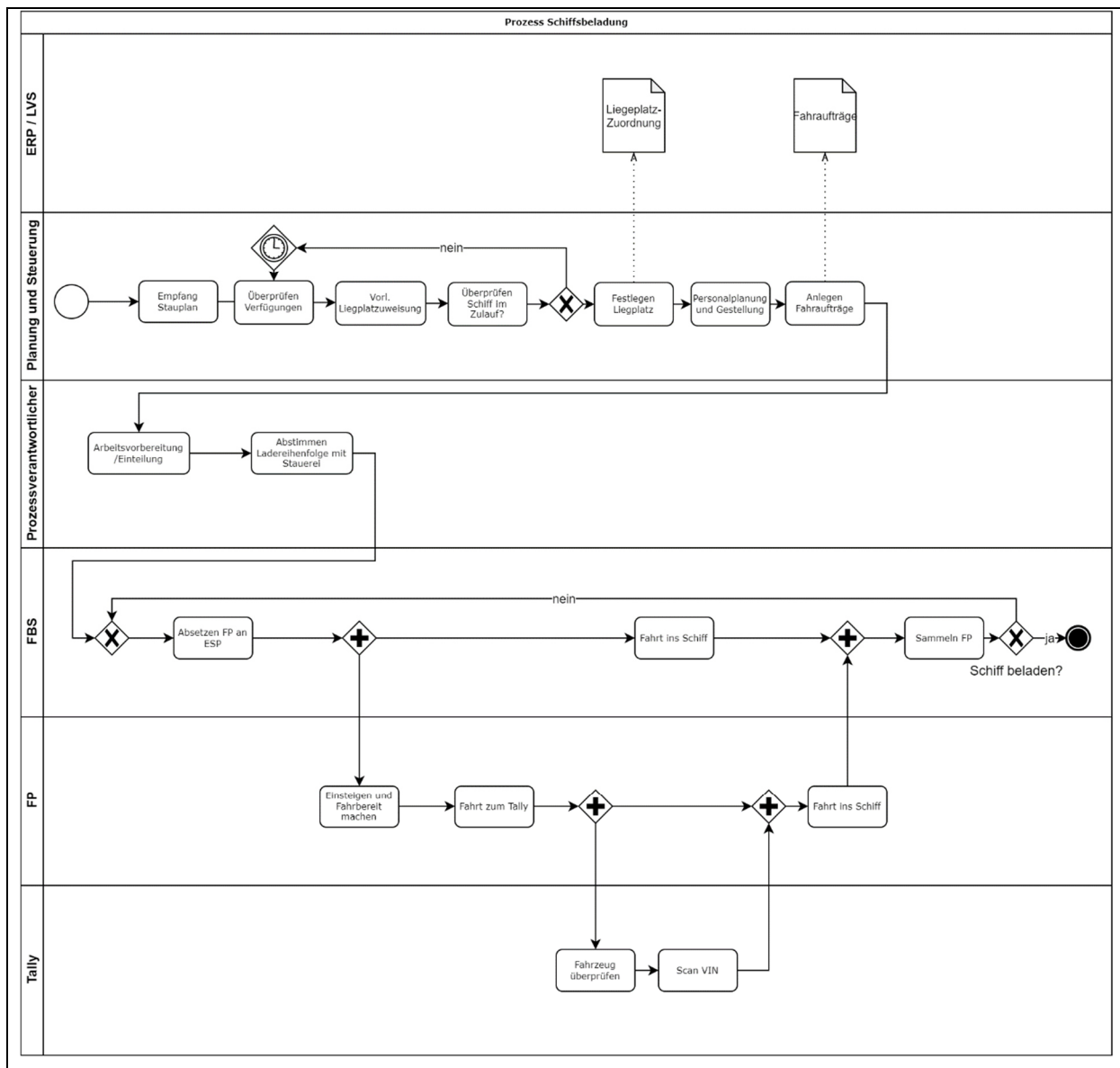
---

## 3.2 Ist-Prozesse und Einflussgrößen

Um die erwarteten Wechselwirkungen zwischen der Logistikleistung des Terminals und dem temporal kaskadierten Planungsprozess für das konkrete Beispiel zu untersuchen, werden in diesem Abschnitt – der Logik von Abbildung 20 folgend – zunächst die Materialflussprozesse und darauf aufbauend die zugehörigen Planungsprozesse beschrieben. Anschließend, wird das exemplarische gewählte Terminalsystem hinsichtlich der unter 2.5.6 postulierten Abhängigkeiten und Einflussgrößen untersucht. Dies dient der weiteren Betrachtung als Ausgangspunkt für eine datengetriebene, Schnittstellenbetrachtung und Potenzialanalyse. Die Aufnahme der Prozesse erfolgt in Form von BPMN 2.0 Diagrammen. Die Nutzung der Business Process Modelling Notation (BPMN 2.0) erlaubt durch eine „swimlaneorientierte“ Darstellungsweise eine transparente Zuordnung von Aktionen zu Rollen (Akteuren), bei gleichzeitigem Erhalt einer übersichtlichen Darstellung der Prozesslogik und des Prozessverlaufs (Allweyer, 2016).

### 3.2.1 Laden Schiff

Üblicherweise wird die Beladung der Schiffe weit vor dem physischen Erreichen des Schiffs am Terminal initiiert. Der Kunde (Reeder) übermittelt einen Stau- und Ladeplan an das Terminal. Dieses Ereignis zeigt auch das BPMN-Diagramm in der Abbildung 31. Es ist das initiale Ereignis für die wasserseitigen Abläufe. Der Stau und Ladeplan gibt Informationen darüber, wie viele Fahrzeuge auf welchem Deck geladen werden sollen. Hierbei werden die Fahrzeuge, wie bereits beschrieben, in Partien gemäß der Fahrzeugeigenschaften Hersteller, Modell und Destination (HMD-Mix) unterteilt. In einem parallelen dispositiven Prozess werden Fahrzeuge dem Schiff zur Verladung zugeordnet. Dieser Verfügungsprozess verläuft nach vordefinierten Regeln. Die Fahrzeuge werden entweder frei nach direkten Abrufflisten der Kunden oder nach ihrer Verweildauer auf dem Terminal (FIFO) ausgewählt. Die Abteilung „Planung und Steuerung“ erhält regelmäßige Updates über die Verfügungen und prüft in einem iterativen Verfahren, welche Kaje die beste Kaje zum Zeitpunkt des erwarteten Ankommens (ETA – estimated time of arrival) des Schiffs ist. Diese Planungen sind nach Abbildung 22 der Liegeplatzvorplanung zuzuordnen. Sie bezieht sich nicht auf einzelne Schiffe, sondern umfasst die Gesamtheit aller angemeldeten Schiffe. In diesem Planungsschritt wird nicht nur die ETA Zeit einbezogen, sondern auch die planerische Liegezeit des Schiffs. Diese planerische Liegezeit ist abhängig von den verfügbaren Kaje, den Fahrwegen der Fahrzeuge (sowohl für das Laden und Löschen) und den verfügbaren Personalkapazitäten.



**Abbildung 31: Ablauf der Schiffsbeladung**

Aufgrund dieser wechselseitig abhängigen Planungsparameter wird die Liegeplatzvorplanung mit rollierenden Zeithorizonten wiederholt und aktualisiert. Zur Validierung der Daten nutzen die Planer ein kollaboratives Planungstool, wie es in der Abbildung 25 dargestellt ist. Auf dieser Grundlage wird ebenfalls durch die Planungs- und Steuerungsabteilung der Liegeplatz final festgelegt, sobald das Schiff im direkten Zulauf ist ( $ETA < 8h$ ). Durch die Festlegung des Liegeplatzes sind alle planerisch benötigten Daten bekannt und die benötigte Personalstärke für die Beladung kann geplant werden. Auch die voraussichtliche Liegezeit wird final bestimmt und dient als planerische Basis für die Liegeplatzplatzvorplanung der folgenden Schiffe. In einem weiteren Schritt werden die Fahraufträge für die verfügbaren Fahrzeuge zu der Kaje generiert.

---

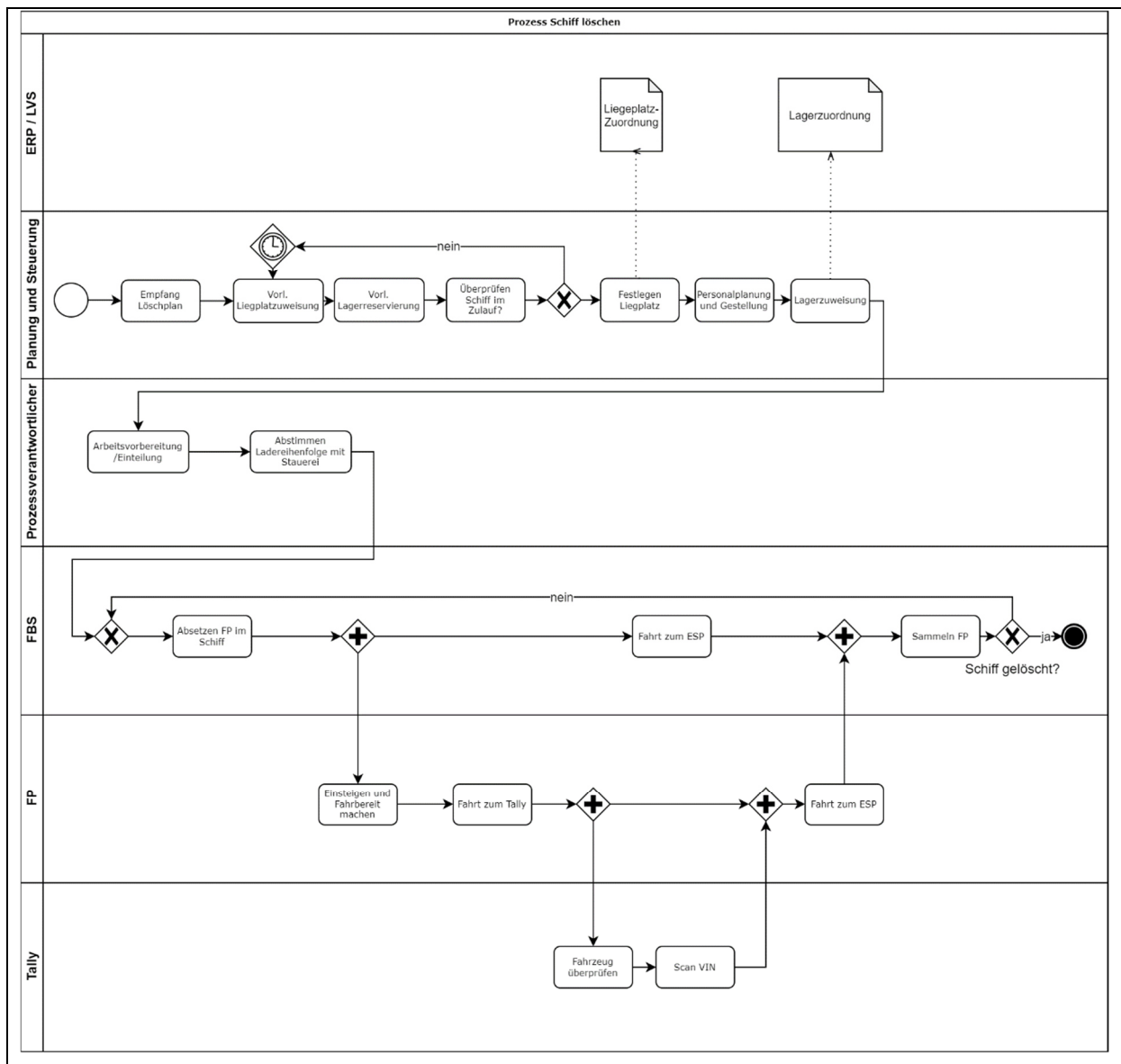
Erst nach diesen Planungsschritten beginnt der eigentliche physische Ladeprozess. Der operativ verantwortliche Mitarbeiter teilt das vorhandene Fahrpersonal auf und legt die Anzahl Busse und Busfahrer (FBS) für die Rückführung von fahrenden Mitarbeitern (FP) aus dem Schiff fest. Zu Beginn fahren die vollbesetzten Busse zu den jeweiligen Endstellplätzen (ESP). Die Mitarbeitenden steigen aus und fahren mit den Fahrzeugen zum Tally (wasserseitiger Checkpunkt). Hier werden die Fahrzeuge einer Sichtprüfung unterzogen und final erfasst (gescannt). Dieser Schritt dient der Vermeidung von Fehlverladungen. Die Mitarbeiter fahren anschließend in das jeweilige Deck und stellen das Fahrzeug ab. Abschließend werden sie wieder durch die Busse eingesammelt. Diese Prozessfolge wird so oft wiederholt, bis das Schiff mit allen geplanten Fahrzeugen beladen wurde.

### 3.2.2 Löschen Schiff

Der Prozess „Löschen Schiff“ beschreibt das Entladen der Fahrzeuge von einem RoRo-Schiff und involviert die gleichen Akteure wie der Prozess Laden. Die Abbildung 32 zeigt die Prozessfolge als BPMN-Diagramm. Ausgangspunkt stellt hier der Empfang des Schiffsmanifests oder der sogenannten Löschliste dar. Diese werden von dem Reeder an das Terminal übermittelt. Wie beim Laden bereits beschrieben, wird auch beim Löschen eine entsprechende Liegeplatzvorplanung vorgenommen und regelmäßig wiederholt und angepasst. Erst wenn die Ankunftszeit (ETA) bekannt ist, und dieses in der nahen Zukunft liegt ( $ETA < 8h$ ) wird der Liegeplatz final fixiert.

Bei Schiffen, welche sowohl gelöscht und beladen werden, bezieht die Liegeplatzplanung sowohl die geplanten Zielstellplätze für das Laden als auch Stellplätze für die zu entladenden Fahrzeuge ein. Hierbei werden die Stellplätze für den Löschvorgang anhand der Flächenmasterplanung ermittelt. Nachdem ein Liegeplatz gewählt wurde, können die Fahrdistanzen für das Löschen und der damit verbundene Personalbedarf ermittelt werden. Die genauen Flächen für das Löschen werden entweder direkt nach diesem Schritt oder parallel hierzu verbindlich reserviert. Anschließend plant der Prozessverantwortliche das Personal ein und ordnet es Busshuttles zu. Weiterhin stimmt die Person sich mit der Stauerei ab, in welcher Reihenfolge Decks gelöscht werden sollen. In dem realen Prozess können hierbei auch parallele Lade- und Löschvorgänge an einem Schiff vorkommen. Die Aufgabe des Prozessverantwortlichen ist die reibungsfreie Koordination der Arbeitsabläufe.





**Abbildung 32: Ablauf der Schiffsentladung**

Das physische Verfahren der Fahrzeuge verläuft vergleichbar zum Laden. Die Busse setzen die Mitarbeiter im zu löschenden Deck ab. Sie wählen sich freistehende Fahrzeuge aus dem Deck aus und fahren zum Tally. Hier werden die Fahrzeuge auf Beschädigungen geprüft und durch einen Scan des im Fahrzeug beiliegenden Barcodes vereinnahmt. Anders als bei der Entladung wird in diesem Schritt gemäß der durch die Planung und Steuerung definierten Reservierungen oder den im Masterplan ausgewiesenen Stellplatzbereichen eine passende Reihe für das Fahrzeug ausgewählt. Der Fahrer oder die Fahrerin fahren anschließend zur genannten Reihe und stellen das Fahrzeug dort ab. Anschließend werden Sie durch den Bus eingesammelt und erneut ins Schiff gefahren. Dieser Prozess wird entsprechend oft wiederholt, bis das Schiff oder die zu löschenden Decks entladen sind.

---

### 3.2.3 Bahnbeladung

Auch die Bahnbeladung wird durch den Empfang von Avisdaten angestoßen (siehe Anhang 1). Anders als bei der Schiffsbe- und Entladung werden die Ankunftspunkte der Züge am Terminal nicht situativ von Zug zu Zug geplant, sondern sie werden auf Volumenbasis im Rahmen der strategischen Verkehrsmittelplanung direkt Anlieferpunkten zugewiesen, da diese normalerweise als planbare Regelverkehre zwischen dem Terminal und den Herstellerwerken getaktet sind. Situative Abweichungen der Gleisankunftspunkte sind dennoch möglich (z.B. im Rahmen von Reparaturarbeiten oder Störungen), allerdings sind sie eher unüblich. Daher können die Gleispunkte der zu be- und entladenen Züge als im Voraus bekannt angesehen werden. Die Personalplanung kann direkt nach der Erstellung der Fahraufträge erfolgen. Aufgrund der konkreten Ladelisten ist eine weitere dispositive Auswahl der Fahrzeuge bei der Bahnbeladung nicht erforderlich. Somit sind in der Regel direkt zu Beginn des Prozesses die konkreten Fahrzeuge und daher auch ihr Lagerort als auch die Gleisanlage bekannt.

Auch bei der Bahnbeladung übernimmt die operative Koordination ein Prozessverantwortlicher vor Ort. Der physische Warenfluss in diesem Prozess ist vergleichbar mit dem Laden eines Schiffs. Die Fahrerinnen und Fahrer bewegen die Fahrzeuge vom Endstellplatz auf den Zug. Sie verlassen das Fahrzeug und werden dann an der Gleisrampe von den Bussen aufgenommen und wieder zu den Stellplätzen für die nächste Tour gebracht. Das vollständige BPMN-Diagramm zu diesem Prozess kann im Anhang 1 eingesehen werden.

### 3.2.4 Bahnentladung

Für die Bahnentladung ist ebenfalls die Avisierung eines konkreten Zuges der Ausgangspunkt des Prozesses. Sie erfolgt üblicherweise nach dem Verlassen eines Zuges am Werk des OEMs. Folglich ist die Zeitspanne zwischen dem Avisempfang und der Ankunft der Fahrzeuge abhängig von der Reisedauer der Züge. Aufgrund der Avisierungen wird durch die Planung und Steuerung überprüft, ob die vorgeplanten Flächen für die Fahrzeuge passend sind, oder ob ggf. Änderungen vorgenommen werden müssen. Wie auch bei den anderen Entladeprozessen wird die initiale Flächenplanung auftragsneutral anhand von generischen Informationen zu Fahrzeuggruppen (u.a. Hersteller, Modell und Destination) vorgenommen. Hierbei werden im Rahmen der Flächenmasterplanung angemeldete Jahresvolumen der Hersteller der verfügbaren Forecastdaten weiter detailliert und entsprechend der zeitlichen Volumenvverteilung auf die verfügbaren Lagerflächen verteilt. Im Rahmen dieser Planungen wird auch die langfristige Zugslotplanung vorgenommen. Hier werden für die Züge der jeweiligen Werke die Gleise für den Betrachtungszeitraum festgesetzt. Daher wird in der

---

Prozessvorbereitung (wie in Anhang 2 dargestellt) keine zusätzliche Gleiszuweisung vorgenommen.

Wie auch in den vorangegangenen Prozessen wird nach den planerischen Schritten die benötigte Personalplanung vorgenommen und an den Prozessverantwortlichen übergeben. Dieser nimmt die Personaleinteilung vor und steuert den operativen Prozess. Auch bei der Bahnentladung bringen Shuttles die Mitarbeiter zum Gleis. Nachdem die Mitarbeiter die Fahrzeuge vom Zug gefahren haben, werden sie optisch in einer Checkschleuse auf Beschädigungen untersucht und mit einem Label, welches auch den Zielstellplatz ausweist, versehen. Die Mitarbeiter fahren die Fahrzeuge zu den entsprechenden Zielflächen und werden dann anschließend von den Shuttles eingesammelt und wieder zum Gleisstrang gebracht.

### 3.2.5 Lkw-Beladung

Die Lkw-Beladung beginnt mit der avisierten Disposition von Fahrzeugen, die geladen werden sollen. Der Anhang 3 zeigt das zugehörige BPMN 2.0 Modell für diesen Prozess. Da sich an verschiedenen Stellen im Terminal Lkw-Ladestellen befinden, wird durch die Planung und Steuerung zunächst der Ladepunkt für den Lkw festgelegt. Gesucht wird der Ladepunkt mit der geringsten Entfernung zum jeweiligen Lagerort der Fahrzeuge. Anschließend werden Fahraufträge für die Fahrzeuge erstellt, welche sich noch nicht auf der Lkw-Übergabefläche befinden und die Personalplanung wird vollzogen. Die entsprechenden Informationen werden an den Prozessverantwortlichen übergeben, welcher die Fahrerinnen und Fahrer einteilt und die shuttlegestützte Durchführung der Fahrten begleitet. Die physische Abarbeitung der Fahraufträge ist vergleichbar mit der bei der Bahnbeladung oder Schiffsbeladung. Nachdem die Fahrzeuge in der Lkw-Übergabefläche stehen und der jeweilige Lkw am Terminal angekommen ist, beginnt der Lkw-Fahrer nach seiner Anmeldung am Terminalgate unmittelbar mit der Beladung der Fahrzeuge auf den Lkw, indem er die bereitgestellten Fahrzeuge sukzessiv auf den Lkw fährt. Anschließend wird die Ware am Gate final geprüft. Nach erfolgter Überprüfung kann der Lkw das Terminal verlassen.

### 3.2.6 Lkw-Entladung

Wie bei den vorgenannten Prozessen markiert das elektronische Avis den Beginn des Entladeprozesses. Nach dem Eingang eines Avis wird durch die Planung und Steuerung ein passender Entladebereich ausgewählt und dem Lkw zugewiesen. Hierbei richtet sich die Zuweisung nach den auf dem Lkw befindlichen Fahrzeugen, bzw. der entsprechenden Fahrzeuggruppen (gruppiert um die Eigenschaften: Hersteller, Modell, Destination). Anhand des Flächenmasterplans sind die entsprechenden Lagerbereiche festgelegt. Die Planer

---

suchen dann die Entladestelle aus, welche möglichst geringe Fahrstrecken zwischen Abladepunkt und späterem Lagerort ermöglichen. Das BPMN-Diagramm in Anhang 4 zeigt diesen Prozessablauf. Nachdem die Abteilung Planung und Steuerung die Abladeorte festgelegt hat, wird die grobe Zuordnung der Lagerflächen geprüft und ggf. die Zuordnung verfeinert. Auch das für das Verfahren benötigte Personal wird in diesem Schritt geplant. Wie bei den übrigen Prozessen wird die operative Ausführung an einen Prozessverantwortlichen übertragen, welcher die Fahrer und Fahrerinnen einteilt und die Fahrten zwischen der Lkw-Übergabestelle und der Lagerfläche organisiert. Die eigentliche Entladung erfolgt durch den Lkw-Fahrer, welcher die Fahrzeuge von dem Lkw in eine Checkschleuse fährt. Hier wird durch Terminalmitarbeiter das Fahrzeug auf Beschädigungen geprüft. Ist das Fahrzeug schadenfrei, wird es vereinnahmt und ein Label mit dem Zielstellplatz gedruckt. Anschließend stellt der Lkw-Fahrer das Fahrzeug auf einer Übergabefläche nahe der Checkschleuse ab. Von hier übernehmen die Mitarbeiter des Terminals die Fahrzeuge und verbringen sie zum ausgewiesenen Endstellplatz. Der Transfer zurück zu der Übergabefläche wird durch entsprechende Shuttles realisiert.

### 3.2.7 Fahrbewegungen im Rahmen von Technikleistungen

Für die Fahrten zur Technik und zurück liegen konkrete Kundenaufträge in Form von Planavisen vor. Die Technikplanenden prüfen zunächst, ob alle Ressourcen (Hebebühnen, Werkzeuge) und benötigtes Material vorhanden sind. Sollte kein Material vorhanden sein, werden erst Bestellungen ausgelöst und der Prozess pausiert entsprechend bis zum Eintreffen des Materials. Der Anhang 5 zeigt den gesamten Prozess als BPMN-Diagramm. Sollten die Ressourcen und das Material vorhanden sein, beginnen die Technikplanenden mit der Auswahl eines entsprechenden Bearbeitungscenters. Neben der Ausstattung und der Verfügbarkeit wird bei der Auswahl die Fahrdistanz zwischen dem Lagerort des Fahrzeugs und der Bearbeitungsanlage berücksichtigt. Nach der Festlegung wird die Personalplanung vorgenommen und an einen Prozessverantwortlichen übergeben. Dieser teilt die Mitarbeitenden ein und überwacht den Prozess des Fahrens. Die Mitarbeitenden verlassen die Shuttles an den jeweiligen Stellflächen und fahren die Fahrzeuge zu den Übergabepätzen an der Technik. Anschließend werden sie eingesammelt und werden wieder zu den Stellflächen gefahren.

Für die Bearbeitung fahren die Mitarbeitenden der Technik das Fahrzeug in die Bearbeitungshallen und führen die geplanten Prozesse durch. Nach der Bearbeitung werden die Fahrzeuge als fertig gemeldet und durch Mitarbeitenden der Technik in den Nachstau gefahren.

---

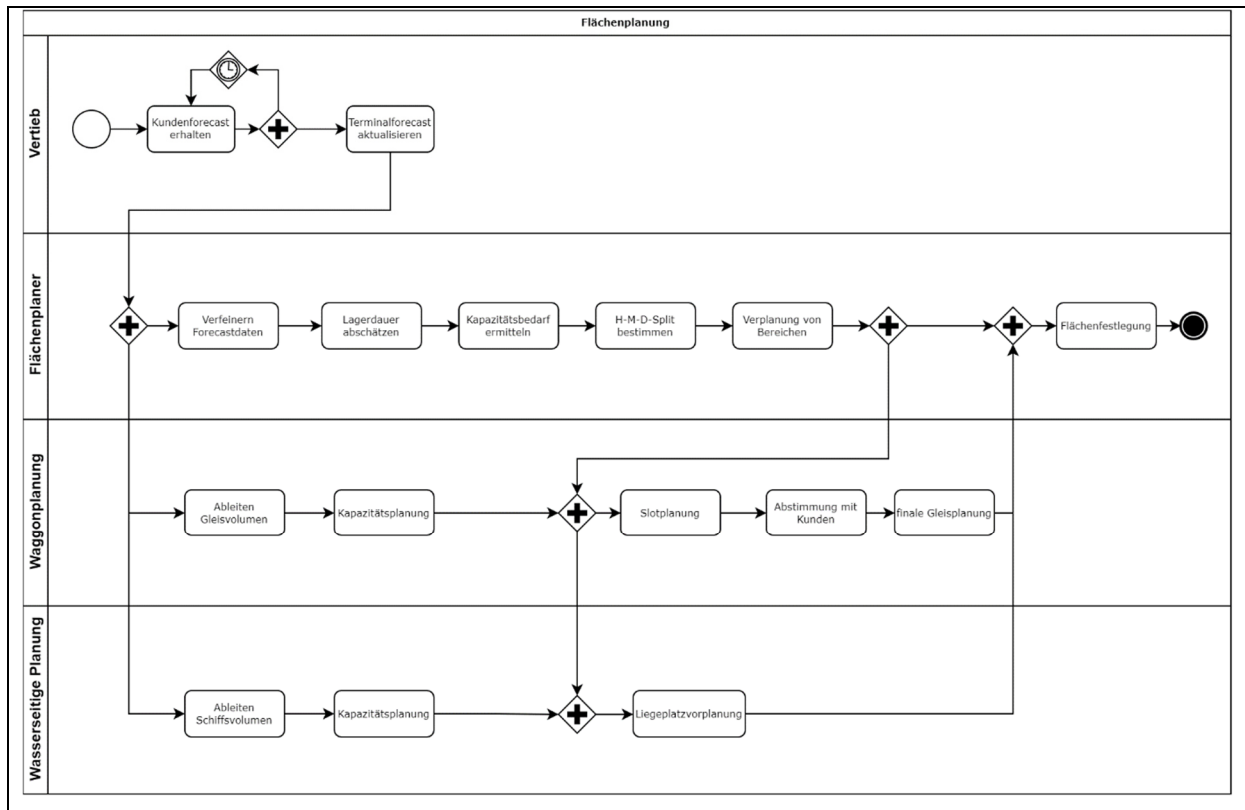
Ab der Fertigmeldung setzt die Planung der Rückführung der Fahrzeuge ins Lager ein. Durch die Planung und Steuerung werden die in der Masterplanung vorgegebenen Stellflächen antizipiert und eine entsprechende Personalplanung durchgeführt. Auch der Rückführungsprozess wird an einen Prozessverantwortlichen übergeben, welcher die Fahrten zwischen dem Technickachstau und den Zielstellflächen analog zu den Zuführungen zur Technik organisiert.

### 3.2.8 Flächenmasterplanung

Durch die auftragsneutrale Zuordnung von Flächen zu Fahrzeuggruppen kommt der Flächenmasterplanung eine besondere Rolle in den Prozessen zu. Sie bedingt die auftragsneutrale Vorplanung der Verkehrsmittel sowie die direkte Flächenallokation, um die Fahrwege zu verkürzen. Vor der Prozessausführung können die Festlegungen auf einen hohen Detaillierungsgrad angepasst werden. Grundlegende Änderung der Fahrzeugaufstellung werden hierdurch in den meisten Fällen allerdings nicht vorgenommen.

Wie beschrieben umfasst der Prozess der Flächenmasterplanung viel Kontext- und Expertenwissen. Auch müssen im Rahmen der Flächenmasterplanung oftmals noch unbekannte Daten (z.B. Detaillierungen zu Mengengerüsten hinsichtlich Eigenschaften wie Modell oder Destination) planerisch antizipiert werden. Daher kann der folgende Prozess der Flächenmasterplanung in der Abbildung 33 als nicht vollständig formalisiert abbildbar angesehen werden.

Ausgangspunkt für den Planungsprozess stellen die Forecasts für alle erwarteten Volumenströme dar. Diese Volumenströme werden hinsichtlich der späteren Sortierungsrelevanz weiter aufgebrochen und fehlende Daten werden gegebenenfalls geschätzt. In der Regel werden die Forecasts der einzelnen Kunden (Reeder und Hersteller) durch den Vertrieb gesammelt und zu einem Terminalforecast verdichtet. Dieser umfasst die zu erwartenden Volumenströme als monatliche Eingangs- und Ausgangsdaten. Diese Daten werden von den Planenden anhand von Erfahrungswerten um relevante Informationen (z.B. Modellinformationen) verfeinert (vgl. Forecastingframework in Abbildung 21). Auch die vermutlichen Standtage der Fahrzeuge auf dem Terminal werden anhand der Volumenströme und Erfahrungswissen abgeschätzt. Aus den Volumendaten und der Standzeit kann der Flächenbedarf für die Lagerung der Fahrzeuge bestimmt werden. Aus dem Flächenbedarf und den aus dem Forecast abgeleiteten Hersteller-Modell-Destination-Split (HMD-Split) wird eine erste Flächenzuordnung erfolgen.



**Abbildung 33: Ablauf der Flächenmasterplanung**

Mit dieser übergeordneten Flächenzuordnung wird zusammen mit den wasserseitigen Planenden und den Planenden für die landseitige Anlieferung (Bahn und Lkw) eine Vorplanung für die jeweiligen Verkehrsmittel vorgenommen. So werden in diesem Schnitt präferierte Kajen für Schiffe mit bestimmten Destinationen bestimmt und Gleisanlagen für die Anlieferung der Hersteller festgelegt. Dieser Prozessschritt erfolgt zeitlich iterativ und wird in enger Zusammenarbeit der beteiligten Bereiche durchgeführt. Erst nachdem die wasser- und landseitigen Verkehrsmittelvorplanungen abgeschlossen sind, wird der Flächenmasterplan finalisiert, in dem HMD-Split feste Flächenbereiche zugewiesen werden. Ziel dieser Planungen ist eine Bereichszuordnung auf dem Terminlayout vorzunehmen, die möglichst kurze Fahrwege ermöglichen. Final werden diese Zuordnungen in ein Regelwerk für die Zuordnungen der eingehenden Fahrzeuge zu Lagerflächen dokumentiert.

### 3.2.9 Zusammenfassung der physischen und planerischen Prozesse

Die Beschreibung der operativen Prozesse zeigt die zentrale Rolle der Flächenmasterplanung und der entsprechenden Verkehrsmittelplanungen. In dem Beispielterminal wird das Zusammenspiel von kundenauftragsneutralen und spezifischen Planungsprozessen deutlich. Der in Kapitel 2.5 beschriebene Zusammenhang bezüglich der Existenz eines Entkopplungspunkts wird durch die detaillierte Prozessbetrachtung belegt. Die folgende

Tabelle 4 greift die in den Prozessen adressierten Planungsschritte auf und ordnet sie zusammenfassend auf den Zeithorizont und die Nutzung von Kundendaten ein.

**Tabelle 4: Relevante Planungen für die betrachteten Prozesse**

Prozess	Planungsaufgabe	Zeithorizont	Planungsobjekt	Auftragsbezug
Eingang Bahn	Bahnslotplanung	Taktisch	Zug & Gleis	○
	Zuweisung Gleis	Operativ	Zug & Gleis	◐
	Flächenplanung	Taktisch	Fahrzeuggruppen	○
	Lagerzuweisung	Operativ	Fahrzeug	◐
Eingang Lkw	Zuweisung Abladeort	Operativ	Lkw	◐
	Flächenplanung	Taktisch	Fahrzeuggruppen	○
	Lagerzuweisung	Operativ	Fahrzeug	◐
Eingang Schiff	Liegeplatzvorplanung	Taktisch	Schiff & Kaje	○
	Liegeplatzplanung	Operativ	Schiff & Kaje	◐
	Flächenplanung	Taktisch	Fahrzeuggruppen	○
	Lagerzuweisung	Operativ	Fahrzeug	◐
Technik	Flächenplanung	Taktisch	Fahrzeuggruppen	○
	Zuordnung Technikcenter	Operativ	Fahrzeug	●
Ausgang Bahn	Bahnslotplanung	Taktisch	Zug & Gleis	○
	Zuweisung Gleis	Operativ	Zug & Gleis	●
Ausgang Lkw	Zuweisung Ladeort	Operativ	Lkw	●
Ausgang Schiff	Liegeplatzvorplanung	Taktisch	Schiff & Kaje	◐
	Liegeplatzplanung	Operativ	Schiff & Kaje	●

○ = auftragsneutral ◐ = teilweise auftragsneutral ● = auftragsbezogen

Bei der Betrachtung von Tabelle 4 wird deutlich, dass alle Verkehrsträgervorplanungen und die Flächenmasterplanung auf der taktischen Zeitskala vorgenommen werden und dann auf dem operativen Zeithorizont aktualisiert und durch eine Planung für konkrete Verkehrsmittel ersetzt werden. Lediglich die Anlieferungsplanung der Züge wird direkt langfristig festgelegt. Die übrigen Verkehrsmittel werden final aufgrund konkreter Informationen bezüglich der möglichen Fahrstecken und der Ressourcenverfügbarkeit (z.B. Kajebelegung) festgelegt.

### 3.3 Datenerhebung und Analyse

Aus qualitativer Sicht stützen die vorstehenden Analysen der Unterkapitel 3.2.3 bis 3.2.9 die Arbeitshypothesen, welche zu Beginn formuliert wurden. Gemäß dem gewählten Vorgehen sollen diese nun aus analytischer Sicht durch die Auswertung von vorliegenden Daten des Beispielterminals weiter fundiert werden. Neben der datengetriebenen Analyse der Effekte beschreibt dieses Kapitel die Datenquellen für die spätere Simulation des realen Terminalbeispiels.

---

### 3.3.1 Datenquellen und Datenerhebung

Als Datenquelle für diese Arbeit wurden Abzüge direkt aus dem IT-System des Terminalbetreibers verwendet. Hierfür würden zunächst alle Daten, welche die Systeme zur Verfügung stellen können, gesichtet und die relevanten Daten ausgewählt. Hierbei wurden drei Typen unterschiedlicher Daten fokussiert: statische Fahrzeugdaten (unveränderlich), Bewegungsdaten (dynamisch), Schiffsdaten (dynamisch). Der Anhang 6 gibt eine Übersicht der verwendeten statischen Fahrzeugkopfdaten. Dieser Anhang weist die lediglich die für die Arbeit relevanten Datenfelder aus. Insgesamt wurden 50 Datenfelder für jedes Fahrzeug zur Verfügung gestellt. Anhand der VIN-Nummer (Fahrgestellnummer) können diese statischen Daten mit den Bewegungsdaten zu einer Historie verknüpft werden. Die Datenfelder der Bewegungsdaten können exemplarisch in Anhang 7 eingesehen werden.

Insgesamt würden für die Analysen und die Simulationen die Daten für das gesamte Jahr 2020 zur Verfügung gestellt. Diese Daten umfassten 1.765.787 statische Datensätze (Fahrzeuge) und rund 4,5 mio Bewegungsdatensätze (siehe Anhang 7 für die Datenfelder der Bewegungsdaten). Aus diesen Daten können bereits alle für diese Arbeit relevanten Daten direkt (Fahrbewegungshistorie, HMD-Mix, Eingangs- und Ausgangspunkte) oder indirekt (Informationen zu Schiffen, Zügen, Lkw) entnommen werden. Für eine einfachere Analyse der wasserseitigen Prozesse wurden zusätzlich 1.245 Daten zu den Schiffen verwendet. Der Anhang 8 zeigt exemplarisch die Datenstruktur und die Erfassung der Daten auf. Die folgende Tabelle 5 fasst die relevanten Basisdaten zusammen

**Tabelle 5: Zusammenfassung der Basisdaten**

	Terminalmodell
Jahres Volumen	1.765.787
Anzahl Schiffe	1.245
Fahrzeuggruppen	7.073
HMD-Kombination	7073
Schiffsreisekategorien	37

Hierbei wurden die Daten der HMD-Kombinationen und der Schiffsreisekategorien aus den Daten berechnet. Die Daten für den Export umfassen 5.367 HMD-Kombinationen und für den Import 1.706 HMD-Kombinationen (Gesamt 7.073). Die Schiffsreisekategorien sollen dazu beitragen, die Schiffsreisen zu kategorisieren. Im Zuge der Auswertung wurden für jedes Schiff die zugeordneten Fahrzeuganzahlen nach Destinationen absteigend sortiert. Für die Zuordnung zu Gruppen wurden jeweils die drei häufigsten Destinationen einer Reise genutzt. Sofern für ein Schiff noch keine Gruppe mit den gleichen Top-3-Destinationen existiert, wird



---

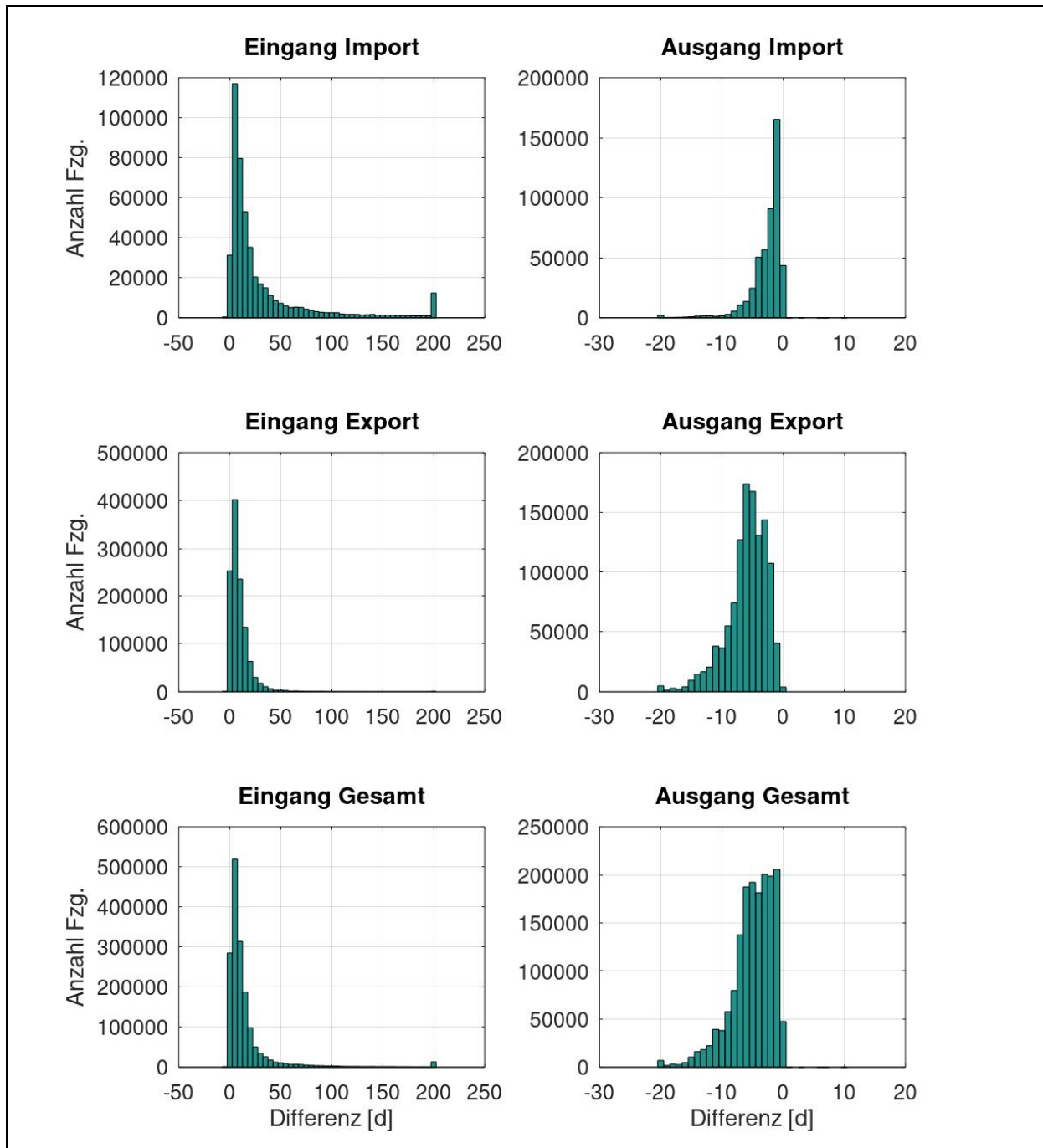
eine neue Schiffgruppe erstellt. Bei der Betrachtung wurden alle Schiffe des Betrachtungszeitraums verwendet.

### 3.3.2 Detailanalysen der Terminaldaten

Die relevanten Basisgrößen wurden in der Tabelle 5 zusammengefasst. Da sehr viele Datenpunkte zur Verfügung stehen, sind vielfältige Auswertungen denkbar. Im Sinne des praktischen Ziels dieser Arbeit soll die Analyse der Absicherung der Arbeitshypothesen aus Kapitel 1.2 dienen. Daher sollen sich die folgenden Auswertungen auf die zeitliche Inflexibilität der Planung sowie auf die vorherrschende Dynamik und Volatilität der ein- und ausgehenden Fahrzeugströme richten.

Das Histogramm in Abbildung 34 zeigt die die Differenz zwischen der Buchungszeit und den jeweiligen Eingangszeiten (links) und Ausgangszeiten (rechts). Hierbei beschreibt die Buchungszeit den Zeitpunkt, zu dem kundenseitig ein fester Ausgangstransportauftrag zugeordnet wurde. Ist die Differenz negativ, so war die Buchung vor dem Ein-, bzw. Ausgang bekannt. Deutlich zu erkennen ist, dass nahezu in keinem Fall ein Ausgangsauftrag vor dem Eingang auf dem Terminal vorlag (0,34 % der Fahrzeuge). In allen diesen Fällen liegt kein konkreter Transportauftrag (z.B. Zuordnung zu Schiff oder Lkw) vor. Bekannt ist neben den Fahrzeuginformationen (Hersteller, Modell, etc.) die gewünschte Transportdestination. Daher muss den Fahrzeugen, wie in Kapitel 2.5 beschrieben, ein Stellplatz auf auftragsneutraler Basis zugewiesen werden. Dies bestätigt, die Arbeitshypothese umfänglich: In dem Terminalbeispiel sind nahezu alle Flächenzuweisungen auftragsneutral. Somit unterliegen die vorangegangenen planerischen Prozesse den beschriebenen Unsicherheiten und weisen die gleiche zeitliche Inflexibilität auf.

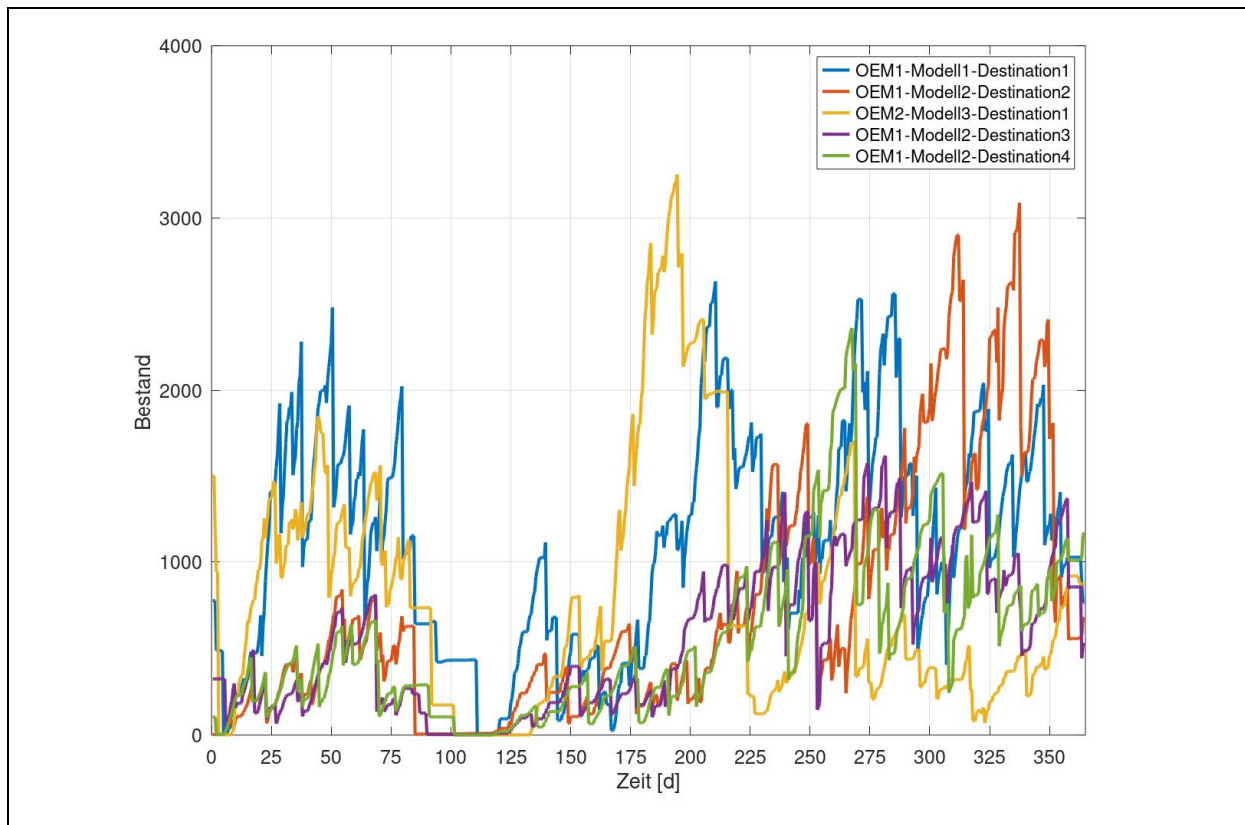
Hinsichtlich der Ausgänge kann zudem erkannt werden, dass keine Buchungen nach dem Ausgang erfolgt sind. Diese ist als zusätzliche Validierung der Daten angesehen zu verstehen, da die Buchungen datentechnisch die Voraussetzung für die Ausgänge sind. Weiterhin kann erkannt werden, dass die Zuordnung von Aufträgen zeitlich kurz vor den Ausgängen erfolgen. Verglichen mit den Eingängen (16,56 Tage im Durchschnitt), ist der Buchungsvorlauf bei den Ausgängen deutlich kürzer mit ca. 5,08 Tagen. Planerisch sind hierdurch mögliche Eingriffshorizonte ebenfalls kurz. Veränderungen der planerischen Größen (z.B. Verschiebungen von Schiffsankunftszeiten) können somit ggf. nur unzureichend in der Planungskaskade berücksichtigt werden.



**Abbildung 34: Zeitliche Differenz von Eingangs- und Ausgangszeit zur Buchungszeit**

Wie vermutet begünstigen diese kurzen Eingriffshorizonte die Anfälligkeit gegenüber dynamischen Störgrößen (z.B. Volatilität der Fahrzeugvolumen). Auf diese Anfälligkeit gegenüber sich dynamisch verändernder Rahmendbedingungen bezieht sich die zweite Arbeitshypothese. Die folgenden Auswertungen sollen überprüfen, ob entsprechende dynamische Veränderungen beobachtet werden können. Hierfür zeigt die folgende Abbildung 35 den Bestandsverlauf der fünf häufigsten HMD-Kombinationen in dem Betrachtungszeitraum (2020). In der Auswertung werden die Hersteller- und Modellinformationen anonymisiert dargestellt. Hierbei ist deutlich zu erkennen, dass sich die

Bestandsverläufe für die einzelnen HMD-Kombinationen sehr individuell entwickeln. Hierbei können die Bestände (wie z.B. bei HMD-Kombination OEM1-Modell2-Destination1) stark schwanken. Insgesamt zeigt die Abbildung, die stark volatile Bestandsentwicklung. Hierbei unterscheiden sich die einzelnen HMD-Kombinationen deutlich. Auch bei gleichen Zielhäfen (OEM1-Modell1-Destination1 und OEM2-Modell3-Destination1) können im zeitlichen Verlauf stark unterschiedliche Bestandverläufe beobachtet werden.

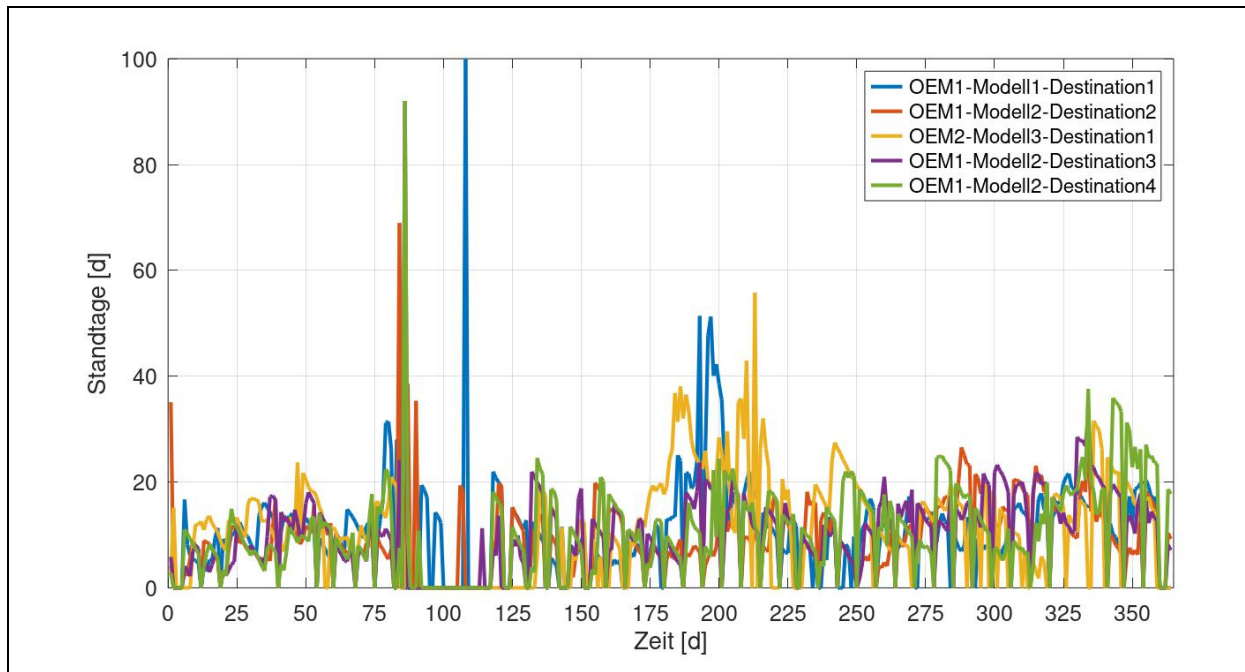


**Abbildung 35: Bestandsverläufe für exemplarische HMD-Kombinationen (Top 5)**

Vergleichbare Verläufe können auch bei weniger volumenstarken HMD-Kombinationen beobachtet werden. Um die Darstellung nicht zu überfrachten, wurde die Abbildung 35 auf die Top 5 (bezogen auf das Umschlagsvolumen) beschränkt. Die Auswertung bestätigt, dass die Eingangs- und Ausgangsvolumen einer hohen Schwankungsdynamik mit erkennbaren Peaks unterliegen. Ein weiterer die Terminaldynamik und den Lagerbestand bestimmender Faktor ist die Verweildauer der Fahrzeuge auf dem Terminal. Wie auch bei der klassischen Lagerhaltung kann eine hohe Varianz in der Verweilzeit zu falschen Zuordnungen der Lagerbereiche führen (ABC-Analyse), bzw. die Anpassung der Zuordnung von Lagerbereichen zu Warengruppen erfordern.

Daher zeigt die folgende Abbildung 36 die zugehörigen Standzeiten der Top 5 HMD-Kombinationen. Konkret zeigt die Abbildung die durchschnittliche Standzeit der Fahrzeuge,

welche gemeinsam an einem Tag auf dem Terminal angekommen sind. Wie schon bei der Abbildung 35 ist eine deutliche Veränderung über die Zeit je HMD-Kombination zu erkennen. Die Standzeiten der HMD-Gruppen sind nicht über die Zeit konstant, sondern variieren teils stark.



**Abbildung 36: Standtageverläufe für exemplarische HMD-Kombinationen (Top 5)**

Da die Standzeit in Kombination mit dem Fahrzeugvolumen den Flächenbedarf determiniert, haben bereits kleine Veränderungen große Auswirkungen auf die verfügbare Terminalkapazität. In dem konkreten Fall des Beispielterminals werden derartige Veränderungen durch das Ausweisen von Ausweichflächen in dem Flächenmasterplan berücksichtigt.

### 3.3.3 Zusammenfassung

Zusammenfassend zeigt das ausgewertete Datenmaterial, dass auch an dem ausgewählten Terminalbeispiel die postulierte temporale Abhängigkeit zwischen einer auftragsneutralen forecastbasierten Planung und der fahrzeugbasierten operativen Planung besteht. Besonders deutlich wird dieser Zusammenhang bei der Betrachtung der Verweildauer und den Beständen. Die Betrachtung zeigt die zwecknotwendige kundenauftragsneutrale Flächenzuweisung der Fahrzeuge. Wie bereits theoretisch unter 2.5 abgeleitet, determiniert diese Zuweisung die Schiffs- und Liegeplatzplanung. Abweichungen und alternative Aufstellungsmöglichkeiten können zur Optimierung von Fahrtfernungen nicht herangezogen

---

werden. Die Analyse der Daten zeigt, dass die für die Arbeitshypothese notwendigen Rahmenbedingungen auch für das Beispielterminal gegeben sind.

### 3.4 Wirkzusammenhänge und Schwachstellenanalyse

Sowohl die theoretische Betrachtung in Kapitel 2.5 zur Bestätigung der Arbeitshypothese als auch die fallbasierte Analyse zeigen, dass durch den kaskadierten Planungsprozess die Produktivität des Gesamtsystems negativ beeinflusst werden kann. Daher sollen im Folgenden, ausgehend von dem Produktivitätsbegriff, potenzielle Schwachstellen aufgedeckt und deren Wirkzusammenhänge als Ansätze für die Synthese von Lösungsvarianten analysiert werden. Wie bereits beschrieben, ist die Produktivität eines Terminals mitunter die wichtigste Zielgröße des Systems, da Terminals wie von Beskovnik und Twrdy (2011) beschrieben, aufgrund ihrer Dienstleisterrolle und der Funktion als Entkopplungspunkt in der Supply Chain wenig Einfluss auf die übrigen Zielgrößen, wie die Flächenauslastung oder den Bestand, haben. Mattfeld (2006) beschreibt die Terminalproduktivität als Verhältnis von gefahrenen Fahrzeugen  $V$  zu der Anzahl eingesetzter Fahrer ( $M$ ) pro Zeit ( $T$ ). Für diese Arbeit wird diese Definition herangezogen. Die Gleichung (1) nimmt diesen Zusammenhang auf und differenziert die Zeit, die Mitarbeiter für die Arbeit benötigen in die Fahrzeit  $T_F$ , die Auftragszuführungszeit  $T_A$  und die Verteilzeiten  $T_V$ . Die Fahrzeit beschreibt die Zeit, die ein Mitarbeiter in einem geplant zu bewegendem Fahrzeug verbringt, um einen Fahrauftrag abzuschließen. Die Auftragszuführungszeit hingegen beschreibt die Zeit, welche die Mitarbeitenden benötigen, um von einem Fahrauftrag zum Nächsten zu gelangen. Sie umfasst alle möglichen Zeitanteile (Gehen oder Fahren mit einem Shuttle). Die sachlichen und persönlichen Verteilzeiten beschreiben als Residualwerte verbleibende Anteile für Fahrten beispielsweise zu Betriebsgebäuden im Rahmen von Pausen (sachliche Verteilzeit) oder andere Prozessunterbrechungen wie Toilettenpausen (persönliche Verteilzeiten). Grundsätzlich können die Verteilzeiten als gegebene Größen angesehen werden, die nicht durch planerische Aktivitäten beeinflussbar sind. Somit determinieren im Wesentlichen die Fahrzeit  $T_F$  und die Zuführungszeit zu den folgenden Fahraufträgen  $T_A$  die Produktivität unter der Annahme, dass sachliche und persönliche Verteilzeiten als fixe Größen angenommen werden.

$$P = \frac{V}{T} = \frac{V}{(T_A + T_F + T_V)} = \frac{V}{(T_A + \frac{S_F}{v} + T_V)} \quad (1)$$

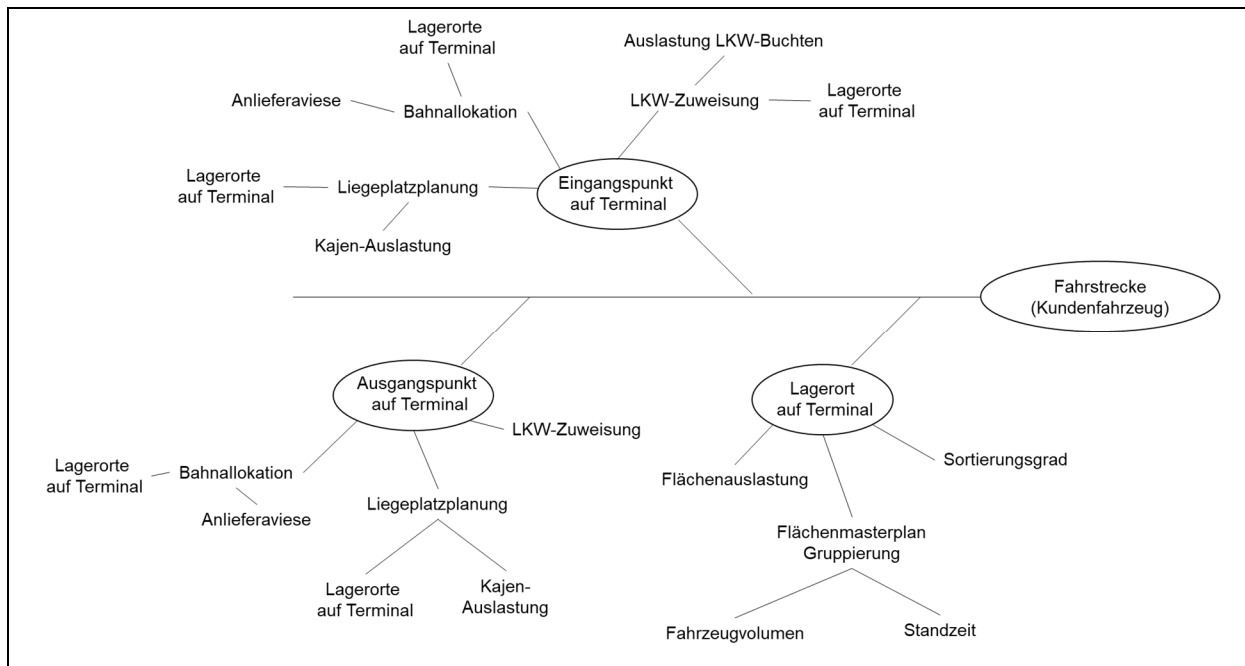
Aus der Perspektive des kaskadierten Planungsproblems kann, wie auch Cordeau et al. (Cordeau et al., 2011) beschreiben, lediglich die Fahrstrecke der zu bewegendem Fahrzeuge durch alternative Flächenaufstellungen optimiert werden. Dieser Zusammenhang kann in

Gleichung (1) erkannt werden: Eine Verringerung der zurückgelegten Fahrstrecken  $S_F$  in dem Betrachtungszeitraum erhöht, bei einer anzunehmenden gleichbleibenden Durchschnittsgeschwindigkeit auf dem Terminal, die Produktivität. Deutlich wird bei der Betrachtung der Gleichung, dass auch die Auftragszuführungszeit einen direkten Einfluss auf die Produktivität hat. Die zugrundeliegende Auftragsverteilung und -abarbeitung ist ein klassischer Gegenstand der operativen Ablaufsteuerung und steht somit nicht im Fokus der Betrachtung dieser Arbeit. Dennoch sei angemerkt, dass, wie Sprodowski und Hoff-Hoffmeyer-Zlotnik (2020) zeigen, auch für die Auftragssteuerung erhebliche Produktivitätssteigerungspotenziale bestehen (Hoff-Hoffmeyer-Zlotnik et al., 2020b). Bei einer Fokussierung auf die planerisch beeinflussbare Fahrzeit  $T_F$  wird deutlich, dass die Anzahl der eingesetzten Mitarbeiter nur nachrangig von Bedeutung ist. Vielmehr determiniert die Fahrzeit und somit die Fahrstrecke  $S_F$  die Auswirkungen auf die Produktivität. Die folgende Gleichung (2) definiert diese Gesamtfahrstrecke eines Fahrzeugs  $i$  auf einem Terminal:

$$S_F^i = S_{FPOR}^i + \sum S_L^i + S_{LPOR}^i \quad (2)$$

Die Gesamtstrecke ergibt sich aus den Bewegungen vom ersten Eingangspunkt (z.B. Gleis) zum ersten Lagerort (FPOR = First Point of Rest). Zusätzlich zu der Initialbewegung werden alle terminalinternen Bewegungen  $S_L^i$  für die Bewegungen zwischen den Lagerflächen  $L$  addiert. Interne Bewegungen können für die Technikbereitstellung oder aber auch im Rahmen von Lagerdefragmentierung entstehen. Der letzte Term von Gleichung (2) beschreibt die finale Bewegung eines Fahrzeugs vom letzten Lagerort (LPOR = Last Point of Rest) zum Ausgangsverkehrsmittel. Hiermit wird die Fahrstrecke und hierdurch die planerisch beeinflussbare Produktivität durch die Festlegung von Eingangspunkten der Verkehrsmittel, der Lagerzuweisung und der Zuweisung von Ausgangspunkten beschrieben. Diese Festlegungen werden im kaskadierten Planungsprozess in den strategischen und taktischen Planungen zur Flächenmasterplanung, der Gleis-Allokation und der Liegeplatzplanungen vorgenommen. Um einen Rahmen für die Lösungsfindung Anforderungen an die Lösung ableiten zu können, werden im Folgenden die konkreten Auswirkungen auf die Fahrwege analysiert. Als Ausgangspunkt für die Synthese von Lösungsvarianten im Rahmen dieser Arbeit zeigt die folgende Abbildung 37 ein Ursache-Wirkungsdiagramm, welches versucht, die theoretisch erkannten Einflüsse sowie die Erkenntnisse des Terminalbeispiels in Bezug auf die zu realisierenden Fahrstrecken zu erfassen. Die Fahrstrecken der Kundenfahrzeuge werden durch drei Determinanten (siehe Gl .2) bestimmt. Die Fahrstrecke wird beeinflusst durch den Eintrittspunkt, den Lagerort und den Austrittspunkt der Fahrzeuge. Wie in der Prozessaufnahme gezeigt, werden Ein- und Austrittspunkte planerisch festgelegt durch die Liegeplatzplanungen, die Zuweisung von Zügen zu Bahnrampen und die Zuweisung von Lkws

zu Entladungspunkten festgelegt. Daher wirken bei beiden Punkten die gleichen Parameter auf die Wahl der jeweiligen Ressourcen.



**Abbildung 37: Ursache-Wirkungsdiagramm Fahrstrecken**

Neben der Auslastung (z.B. der Kajen oder Lkw-Stellplätze) haben die Lagerorte der Fahrzeuge eine zentrale Rolle für die Zuweisung von Verkehrsmitteln zu Ent- und Beladepunkten. Dieser Faktor, der Lagerort, hat zudem einen direkten Einfluss auf die Fahrstrecke selbst. Die Wahl des jeweiligen Lagerorts wird durch die ausgewiesenen Flächen gemäß des Flächenmasterplans um dem aktuellen Flächenbelegungsgrad bestimmt. Letztlich hat auch die Sortierung der Flächen einen Einfluss auf die Fahrstrecken, da durch eine unzureichende Sortierung, zusätzliche Bewegungen für Sortiermaßnahmen entstehen können.

Die Zusammenfassung in Form eines Ursache-Wirkungsdiagramms verdeutlicht die Anforderungen, welche an eine Lösung für eine neue dynamische Aufstellung gefordert werden sollten. Durch eine Verringerung von Fahrstrecken kann eine direkte Produktivitätssteigerung erzielt werden. Eine Lösung, welche eine geeignete dynamische Fahrzeugallokation auf dem Terminal ermöglicht, ohne die Entfernungsbeziehungen zu den möglichen Eingangs- und Ausgangspunkten zu vernachlässigen, erscheint besonders zielführend. Daher sollte ein Lösungsansatz nicht ausschließlich auf eine dynamische Flächenallokation zielen, sondern weiterhin eine integrierte Lösung zur Zuweisung von Verkehrsmitteln- und ausgangspunkten erlauben. Hierdurch können die wechselseitigen

---

Abhängigkeiten zwischen der Flächen- und der Verkehrsmittelallokation direkt berücksichtigt und Potenziale bestmöglich genutzt werden.

## **4. Konzipierung und Modellierung einer integrativen Terminalplanung**

In diesem Abschnitt sollen die Erkenntnisse aus der Betrachtung des Beispielterminals aufgegriffen und mit den theoretischen Hypothesen zu der temporalen Abhängigkeit des kaskadierten Planungsprozesses abgeglichen werden. In Anlehnung des für diese Arbeit zugrundeliegenden SE-Vorgehensmodells entspricht dieser Schritt der Zielformulierung im Rahmen der Mikro-Logik. Folglich soll aufgrund der identifizierten Potenziale ein gewünschtes Zielbild möglichst klar abgeleitet werden. Um die eine möglichst allgemeingültige spätere Übertragbarkeit sicherzustellen, soll dieses Zielbild um die bereits in den vorherigen Schritten identifizierten Erfolgskriterien angereichert werden.

### **4.1 Anforderungskatalog an eine integrative Planungsmethodik**

Aus den vorstehenden Überlegungen und Analysen wurde die Hypothese aufgestellt, dass die Terminalproduktivität durch eine integrierte dynamische Flächen- und Verkehrsmittelallokation signifikant gesteigert werden kann. Durch eine gelungene Integration können die wechselseitigen zeitlichen und logischen Abhängigkeiten zwischen den jeweiligen Planungsschritten reduziert und Leistungspotenziale erschlossen werden. Ferner stellt die Überwindung temporalen Inflexibilität der klassischen kaskadierten Planung (siehe Abbildung 20) eine weitere übergeordnete Anforderung dar, welche durch eine neue Planungsmethodik erreicht werden sollte. Dieser Hypothese folgend, werden in diesem Kapitel relevante Anforderungen spezifiziert. Die Festlegung der Anforderungen und die Formulierung eines Zielsystems sind als Schritt der Zielformulierung im Rahmen der angewendeten Mirko-Logik zu verstehen. Die Anforderungen und das Zielsystem dienen im Zuge der Evaluation der Verifizierung dieser Grundhypothese und der Bewertung der Lösungen im Vergleich zur Ist-Situation. Hierbei wird im Folgenden zwischen direkten und indirekten Anforderungen unterschieden. Die direkten Anforderungen stehen in direktem Wirkzusammenhang zu der Produktivität (Gleichung (1) und (2)), während die Nebenanforderungen aus den beschriebenen Prozessen resultieren und als realitätsnahe Anforderungen verstanden werden können. Die Hauptanforderungen sind:

- Erzielung möglichst kurzer Fahrwege für alle Fahrzeugbewegungen
- Erzielung eines hohen Sortiergrads für alle Fahrzeuggruppen



---

Die erste Anforderung kann direkt aus der Gleichung (1) abgeleitet werden. Eine dynamische Flächen- und Verkehrsmittelallokationsmethode, welche zu kürzeren Fahrwegen der Kundenfahrzeuge über die gesamte Verweilzeit führt, trägt zur Steigerung der Produktivität bei. Um möglichst umfassend zu wirken, muss die Methode, die in Gleichung (2) beschriebenen Teilstrecken möglichst integriert adressieren. Andernfalls könnten partiellen Zugewinne (z.B. Weg zur Lagerfläche) zu Verlusten in anderen Bereichen (z.B. Weg zum Verkehrsmittel) führen.

Die Betrachtung der Terminalprozesse und die Analyse der Wirkzusammenhänge haben den Einfluss des Sortiergrads auf die Produktivität verdeutlicht. Ein hoher Sortiergrad hilft unnötige Fahrzeugbewegungen im Rahmen von Ausstauaktivitäten oder im Zuge einer Lagerdefragmentierung zu vermeiden. Die Einhaltung eines hohen Sortiergrads reduziert somit die Anzahl variabler lagerinterner Fahrbewegungen  $\sum S_L^i$  in der Gleichung (2).

Neben diesen direkt mit der Fahrstrecke verbundenen Anforderungen können die weiterführenden indirekten Anforderungen aus den Erfordernissen der Prozesse abgeleitet werden. Sie stellen Rahmenbedingungen dar, welche trotz Veränderungen der Flächen- und Verkehrsmittelallokationsmethode eingehalten werden sollten, um die geltenden Prozessmodalitäten nicht zu verletzen und das Ziel der Produktivitätssteigerung zu unterstützen. Diese Nebenanforderungen sind:

- Hohe Auslastung verkehrsgünstiger Flächen
- Erhalt von FIFO-Reihenfolgen in den Lagerreihen
- Kurze Verweildauern von Verkehrsmitteln

Wie bereits beschrieben, ist eine hohe Auslastung von verkehrsgünstigen Flächen ein Gegenstand der aktuellen Ansätze zur Flächenmasterplanung. Diese Forderung scheint aus der Perspektive der logistischen Zielsetzungen sinnvoll (siehe Abbildung 13) und kann aus der allgemeinen Zielsetzung der Lagerhaltung abgeleitet werden. Auch in klassischen Lagersystemen (z.B. Palettenregallager) werden mittels ABC-Analysen häufig umgeschlagene Warengruppen identifiziert und sogenannte „high-runner“ mit möglichst kurzem Weg für die Güterhandhabung im Lager positioniert (Chen et al., 2008). Somit steht die Auslastung verkehrsgünstiger Flächen im Einklang mit der genannten Hauptanforderung.

Die Anforderung, möglichst das FIFO-Prinzip in den Lagerreihen aufrechtzuerhalten, resultiert im Wesentlichen aus dem gewählten Anwendungsfall. Wie in der Prozessaufnahme beschrieben, fordern die Verkehrsmittel die Fahrzeuge in der Regel nach ihrer Verweilzeit auf dem Terminal ab. Sollten Fahrzeuge mit starken Abweichungen dieser Eigenschaft dennoch

---

in einer Reihe stehen, sind sehr wahrscheinlich Ausstauvorgänge und zusätzliche Fahrwege die Folge. Daher sollte eine Lösung das FIFO-Prinzip entsprechend berücksichtigen können.

Die Forderung nach kurzen Verweildauern der Verkehrsmittel ist einerseits ein generelles operatives Erfordernis aus Sicht der Betreiber der Verkehrsmittel. Nur durch kurze Verweildauern (z.B. Liegezeiten) können die Verkehrsmittel möglichst effizient genutzt werden. Auch aus Sicht des Terminals und der entsprechenden Planungsfragestellungen sind möglichst kurze Verweildauern wünschenswert. Durch kürzere Verweildauern können Umschlagsressourcen wie Kajen besser genutzt werden. So können beispielsweise durch kürzere Liegezeiten Kajen mit möglichst kurzen Fahrwegen zu den entsprechenden Lagerflächen besser genutzt werden. Dies führt direkt zu kürzeren Fahrwegen.

## 4.2 Ableiten eines Zielsystems

In diesem Kapitel sollen die genannten Anforderungen in Form eines geeigneten Zielsystems operationalisiert werden. Hierbei sollen für die einzelnen Anforderungen Messgrößen definiert und einheitlich beschrieben werden. Diese Messgrößen werden als Basis für die Methodenentwicklung und im Verlauf der Evaluation herangezogen.

### Fahrstecken

Im Zuge der Definition der Produktivität wurde bereits durch die Gleichung 2 die Fahrstrecke eines einzelnen Fahrzeugs  $S_F^i$  als die Summe aller Einzelfahrstrecken im gesamten Lebenszyklus des Fahrzeugs auf dem Terminal definiert. Sie umfasst die Fahrstrecke von der Quelle (Bahn, Lkw oder Schiff) zum ersten Lagerort (FPOR), alle Fahrbewegungen zwischen einzelnen Lagerbewegungen sowie die Strecke zum Ausgangsverkehrsmittel (LPOR). Für die Bewertung von Szenarien werden die durchschnittlichen Fahrstrecken aller  $k$  bewegten Fahrzeuge herangezogen. Die durchschnittliche Fahrstrecke wird nach Gleichung (3) bestimmt:

$$FS = \frac{\sum_{i=1}^k S_F^i}{k} = \frac{\sum_i S_{FPOR}^i + \sum S_L^i + S_{LPOR}^i}{k} \quad (3)$$

Im Sinne eines Zielsystems ist die Gesamtfahrstrecke und infolgedessen die durchschnittliche Fahrstrecke je Fahrzeug in einem Szenario möglichst niedrig zu halten, um eine möglichst hohe Produktivität zu gewährleisten.

### Sortiergrad

Der Sortiergrad dient der Beschreibung des Grads der Durchmischung verschiedener Fahrzeuggruppen auf dem Terminal. Wie bereits beschrieben, stellen planerisch gewählte

---

Gruppierungen der zu bewegenden Fahrzeuge die Grundlage für die entsprechenden Planungen dar. Für die Bestimmung des Sortiergrads sollen, analog zu den Überlegungen in 3.2 und zu den Prozessen des beschriebenen Beispielterminals, Fahrzeuge anhand vordefinierter Eigenschaften (z.B. HMD-Split) in  $G$  verschiedene Gruppen eingeteilt werden. Die Zuordnung von Fahrzeugen in Gruppen soll in der Ausarbeitung, ähnlich wie in dem exemplarischen Terminal, an den Fahrzeugeigenschaften, welche üblicherweise zur Sortierung herangezogen werden, orientieren (HMD-Mix):

- OEM: Fahrzeughersteller
- Fahrzeug-Modell
- Destination: Bestimmungsort für die finale Distribution der Fahrzeuge (z.B. Zielhafen)

Grundsätzlich sind auch weitere beliebige Fahrzeugeigenschaften für eine weitere Differenzierung (z.B. Untermodell-Gruppen) vorstellbar. Um eine möglichst gute Vergleichbarkeit mit dem Beispielterminal zu erzielen, wird im Rahmen dieser Arbeit die Differenzierung auf die genannten Faktoren beschränkt.

In Übereinstimmung mit den unter Kapitel 2.5 und 3.2 vorgestellten Planungszielgrößen soll der Sortiergrad auf zwei unterschiedlichen Granularitätsebenen definiert werden. Die feinste Granularität stellt der Sortiergrad auf Reihenebene  $SGR_r$  dar. Er beschreibt das Verhältnis der Anzahl der Fahrzeuge  $MaxG_r$  der am häufigsten in einer Reihe  $r$  vorkommenden Fahrzeuggruppe zur Gesamtanzahl der Fahrzeuge in einer Reihe. Die folgende Gleichung (4) beschreibt den reihenbezogenen Sortiergrad.

$$SGR_r = \frac{MaxG_r}{R_r} \quad (4)$$

Im Gegensatz zu dem reihenbezogenen Sortiergrad ist der flächenbezogene Sortiergrad  $SGF_F$  gröber. Er bezieht sich auf das Verhältnis der Anzahl der Fahrzeuge  $MaxG_F$  der am häufigsten in einer Fläche  $F$  vorkommenden Fahrzeuggruppe zur Gesamtanzahl der Fahrzeuge in einer Fläche. Eine Fläche wird in diesem Zusammenhang durch eine vorbestimmte Zuordnung von Reihen definiert. Die folgende Gleichung (5) definiert den flächenbezogenen Sortiergrad:

$$SGF_F = \frac{MaxG_F}{AF_F} \quad (5)$$

## 4.3 Modellierung eines generischen Terminalsystems

### 4.3.1 Verknüpfung von Flächen- und Verkehrsmittelzuordnung

Um eine möglichst hohe Produktivität erzielen zu können, ist eine Erzielung eines kurzen Gesamtfahrwegs der Fahrzeuge auf dem Terminal von zentraler Bedeutung. Die determinierenden planerischen Grundlagen sind hierfür einerseits die Flächenmasterplanung und andererseits die Verkehrsmittelzuordnung (Liegeplatzplanung, Lade und Entladeplanung). Um eine möglichst kurze Strecke zu realisieren, sollte eine neue Lösungsmethodik, auf Grundlage der zum Planungs-, bzw. Entscheidungszeitpunkts verfügbaren Daten, die wechselseitigen Abhängigkeiten zwischen Flächenzuordnung (auftragsneutral) und Verkehrsmittelzuordnungen berücksichtigt werden. Dieser Zusammenhang gilt grundsätzlich für die Abhängigkeiten zwischen der Flächenmasterplanung und allen Verkehrsmittelplanungen, er wird bei der Betrachtung des Zusammenwirkens von Flächenmasterplanung und Liegeplatzplanung besonders deutlich: der klassische kaskadierte Planungsprozess verknüpft im linearen Zeitverlauf die Flächenplanung und Liegeplatzplanung durch sukzessive Abfolgen. Die Abbildung 38 zeigt diese zeitliche Abfolge schematisch. Auf Grundlage der Flächenplanung und der aktuellen Fahrzeugpositionierung wird die Liegeplatzplanung vorgenommen. Dies bildet wiederum die Ausgangssituation für den nächsten Planungszyklus. Folglich bauen die neuen Planungen auf den Umsetzungsergebnissen der vorherigen Planungen auf. Eine integrierte Problemformulierung wird nicht vorgenommen und scheint aufgrund der Problemkomplexität nicht realistisch umsetzbar zu sein. Die theoretischen Betrachtungen in dem 2.5 haben bereits gezeigt, dass sowohl die Flächenmasterplanung als auch die Liegeplatzplanung separierte Planungsprobleme aus Sicht der algorithmischen Lösungskomplexität NP-Schwer sind ((Bierwirth und Meisel, 2010, 2015; Cordeau et al., 2011)). Folglich sind auch Kombinationen dieser Probleme NP-Schwer und können nicht optimal für größere Probleminstanzen gelöst werden. Aus diesem Grund können in der Literatur keine integrierten Lösungsansätze gefunden werden.

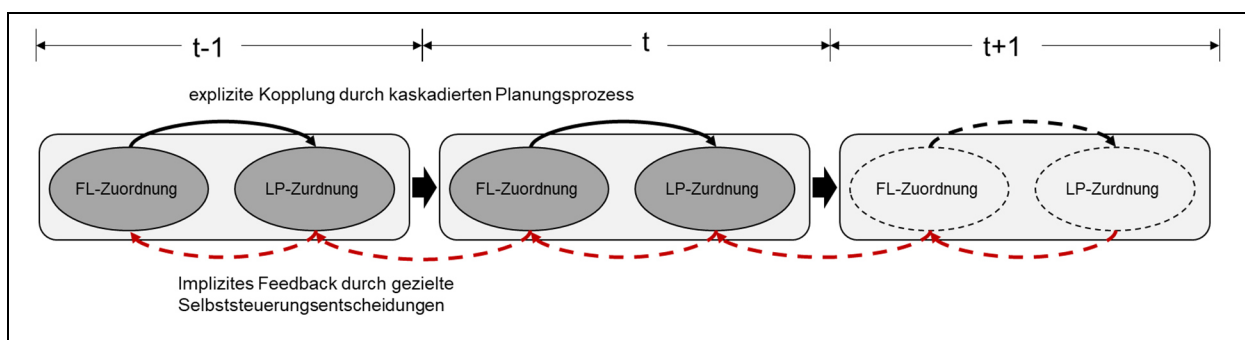


Abbildung 38: Rückkopplung im Zuordnungsprozess

---

Für die Entwicklung einer entsprechenden Selbststeuerungsmethode ist eine konsistente, vollständige mathematische Problembeschreibung allerdings nicht zwingend notwendig. Benötigt wird eine detaillierte Beschreibung der Entscheidungsprozesse, deren Parameter und der Rückkopplungsprozesse. Auch wenn die realisierten KPIs als Ergebnis von ineinandergreifenden Prozessen (siehe Gleichung 3) verstanden wird, ist eine separierte Betrachtung der Planungsprobleme im Rahmen dieser Arbeit sinnvoll. Um später einen einheitlichen Vergleich zwischen der neuen Selbststeuerungsmethode und dem klassischen kaskadierten Planungsprozess vornehmen zu können, sollen einheitliche Parameter und Variablen für die Problembeschreibung verwendet werden.

#### 4.3.2 Anforderungen an ein allgemeines Modell

Um eine zu den definierten Anforderungen passende Lösung zu entwickeln und diese mit einem entsprechenden Zielsystem zu bewerten, wird ein modellhaftes Verständnis benötigt. Daher wird im Folgenden ein allgemeines Modell eines Autoterminals entworfen, mittels dessen ein möglichst breites Spektrum von Terminalszenarien abgedeckt werden kann. Aus den anfangs formulierten Arbeitshypothesen sowie aus den beschriebenen Anforderungen an eine mögliche Lösung, resultieren Eigenschaften, die das Modell abbilden muss. Die Anforderungen an ein solches Modell werden im Folgenden zusammengefasst:

- 1) Struktureller Aspekt: Das Modell muss die in Kapitel 3.1 und 3.2 dargestellten strukturellen Elemente abbilden können. Hierzu zählen: Lagerflächen, Lagerreihen, Fahrwege, Eingangspunkte für Verkehrsmittel, Ausgangspunkte für Verkehrsmittel.
- 2) Objekte: Das Modell muss die durch die Planungen tangierten Objekte berücksichtigen und abbilden können. Hierzu zählen einzelne Fahrzeuge, Gruppen von Fahrzeugen (siehe Kapitel 3.3), einzelne Verkehrsmittel (Schiff, Bahn, Lkw) sowie eine Zuordnung von Verkehrsmitteln zu Gruppen. Hinsichtlich der Objekte muss das Modell entsprechende intelligente logistische Objekte umfassen und abbilden können.
- 3) Im Rahmen der Hauptstudie sollen geeignete Selbststeuerungsmethoden abgeleitet und verglichen werden. Um eine Bewertung der Funktionsfähigkeit und Sinnhaftigkeit der Methoden zu erlauben, müssen die beschriebenen planerischen Prinzipien in dem Modell umgesetzt werden können (siehe Kapitel 2.5 und 3.2.9). Aus der Problem- und Anforderungsanalyse in Kapitel 3.4 ist deutlich geworden, dass Ansatzpunkte für eine neue Planungsmethodik sowohl in der Flächenzuordnung als auch in der Verkehrsmittelzuordnung (insbesondere Liegeplatzplanung) liegen. Daher sollten speziell diese Teilprobleme umsetzbar sein.

- 
- 4) Umsetzbarkeit von bestehenden Planungsansätzen, um einen sinnvollen Vergleichsbenchmark der Methoden erhalten zu können. In dem Modell muss mindestens eine bestehende Flächenplanungsmethode und eine Liegeplatzplanungsmethode angewendet werden können.
  - 5) Umsetzbarkeit von Selbststeuerungsmethoden: neben der Möglichkeit, klassische Planungsprinzipien abzubilden, muss das Modell auch ermöglichen, verschiedene Selbststeuerungsmethoden zu implementieren. Die relevanten logistischen Objekte und Eingriffsmöglichkeiten für lokale Entscheidungen von intelligenten logistischen Objekten müssen abbildbar sein.
  - 6) Abbildung von verschiedenen Graden von dynamischer Komplexität. Die zweite zentrale Arbeitshypothese dieser Arbeit besagt, dass eine selbststeuernde Lösung insbesondere unter dynamischen und komplexen Einsatzsituationen zu besseren Lösungen führen wird. Um, diese Hypothese zu verifizieren, muss das Modell in der Lage sein verschiedene Komplexitätsgrade abzubilden.
  - 7) Abbildung von verschiedenen Graden von struktureller Komplexität. Wie in Kapitel 2.1.2 beschrieben, ist neben der dynamischen auch die strukturelle Komplexität maßgeblich für die Untersuchung der Arbeitshypothese. Das Modell muss eine Variation der strukturellen Komplexität (z.B. durch flächenmäßige Skalierbarkeit) ermöglichen.

#### 4.3.3 Formulierung eines generischen Terminalmodells

Auf Basis dieser Anforderungen wurde ein generisches Terminalmodell entwickelt, welches der Erstellung von unterschiedlichen Szenarien dient. Die folgende Abbildung 39 zeigt dieses generische Terminalmodell und seine wesentlichen Kernelemente. Es besteht aus einer frei definierbaren Anzahl von Lagerflächen  $A_{nm}$ . Jede Lagerfläche (auch Block genannt) hat eine freiwählbare Länge  $w_{nm}$  und Höhe  $w_{nm}$ . Sofern symmetrische Szenarien (wie in der Abbildung gezeigt) analysiert werden, sind Länge und Höhe für alle Flächen identisch. Jede Lagerfläche besteht aus einer wählbaren Anzahl ( $H$ ) Reihen  $R_h$  (für  $h = 1$  bis  $H$ ). Die Kapazität der Reihen ist von ihrer Länge und der Länge der zu lagernden Fahrzeuge abhängig. Verbunden sind die Flächen durch Fahrwege. Die Länge der Fahrwege ist, wie in der Abbildung gezeigt, abhängig von Lage und Dimensionen der Lagerflächen. Grundsätzlich können Lagerflächen nicht durchquert werden, sie sind nur über das Wegenetz erreichbar. Um die geforderte Anwendbarkeit von existierenden Flächenplanungsansätzen sicherzustellen, baut das Modell teilweise auf den von Cordeau et al. 2010 beschriebenen Eigenschaften auf. Daher werden Kernelemente der vorgeschlagenen Notation auch für diese Arbeit übernommen:

- 
- $K = \{1, \dots, |K|\}$ , Fahrzeuggruppen: Die Gruppierung kann frei nach dem jeweiligen Szenario gewählt werden. Wie bereits beschrieben wird eine gängige Gruppierung anhand der Fahrzeugeigenschaften (Hersteller, Modell, Destination) vorgenommen.
  - $T = \{1, \dots, |T|\}$ , Unterteilung des Betrachtungszeitraums in Zeitschritte
  - $n^k$ , Anzahl Fahrzeuge in der Gruppe  $k$
  - $v_r^k$ , Reihenkapazität für eine Reihe  $r$  für Fahrzeuge der Kategorie  $k$
  - $a^k \in T$ , Ankunftszeit einer Fahrzeuggruppe
  - $b^k \in T$ , Abgangszeit einer Fahrzeuggruppe
  - $o^k$ , Ankunftspunkt einer Fahrzeuggruppe
  - $d^k$ , Abgangspunkt einer Fahrzeuggruppe
  - $c_{o^k r}^k$  Handhabungszeit bei Entladung von Gruppe  $k$  und einer Zuordnung zu Reihe  $r$
  - $c_{rd^k}^k$  Handhabungszeit beim Laden von Gruppe  $k$  und einer Zuordnung zu Reihe  $r$

Cordeau et al. (2010) formulieren, ähnlich wie Gleichung (3), die für die Flächenplanung zu lösende Zielfunktion als:

$$\min \sum_{k \in K} \sum_{r \in R} (c_{o^k r}^k + c_{rd^k}^k) y_r^k \quad (6)$$

Mit den Nebenbedingungen:

$$\sum_{r \in R(k)} y_r^k = 1 \quad \forall k \in K, \quad (7)$$

$$y_r^k + y_s^h \leq 1 \quad \forall (k, r, h, s) \in \phi$$

$$y_r^k \in \{0,1\} \quad \forall k \in K, \forall r \in R(k)$$

Die von Cordeau et al. formulierte Zielfunktion dient der Lösung des Problems als ganzzahliges Optimierungsproblem und zielt auf eine Minimierung der Handhabungszeiten der Fahrzeuge. Die beschriebenen Nebenbedingungen besagen, dass jede der betrachteten Fahrzeuggruppen zu genau einer Fläche, bzw. Reihe zugeordnet werden und das Zuordnungs- und Kapazitätsrestriktionen nicht verletzt werden. Die Abbildung 39 zeigt, die gemeinsamen Systembestandteile eines generischen Modells mit den von Cordeau et al.





---

Objekte werden die Verkehrsmittel durch  $V^{in}$  und  $V^{aus}$  beschrieben. Auch eine Differenzierung nach Art des Verkehrsmittels ist entsprechend möglich (z.B.  $V^{Zin}$  für Züge,  $V^{Lin}$  für Lkw oder  $V^{Saus}$  für Schiffe).

Um, wie in den Anforderungen definiert, auch bestehende Planungsmethoden anwenden zu können, ist eine weitere Differenzierung der Fahrzeuge und Verkehrsmittel in Gruppen notwendig. Unabhängig von den Kriterien, welche für die Definition von Gruppen herangezogen werden sollen, beschreibt  $K$  die Zuordnung von Fahrzeugen zu einer Gruppe. Je nach Betrachtungskomplexität sind auch verschiedene Gruppenzugehörigkeiten von Fahrzeugen denkbar und in dem Modell abbildbar (z.B. per Schiff ankommende Fahrzeuggruppen, Gruppen von Fahrzeugen für ein Schiff oder eine Gruppe von Schiffen). Fahrzeuge können folglich auch zu mehreren Gruppen während ihres Terminalaufenthalts gehören. So kann beispielsweise ein Fahrzeug einerseits zu einer Quellengruppierung (z.B. alle Fahrzeuge eines bestimmten Zugs) und andererseits zu einer anderen Senkengruppe (z.B. alle Fahrzeuge zu einer bestimmten Destination) gehören. Analog zu der Zuordnung von Fahrzeugen zu Gruppen benötigen bestehende Terminalplanungsansätze die Möglichkeit ankommende und abgehende Verkehrsmittel in Gruppen einzuordnen. Ein klassisches Beispiel hierfür sind Schiffe, welche auf einem bestimmten Liniendienst operieren (siehe auch 2.4.3). So werden im Rahmen der Liegeplatzzuordnung oftmals abgehende Schiffe nach ihren Besuchsdestinationen in Gruppen zusammengefasst. Denkbar sind derartige Gruppierungen auch für die übrigen Verkehrsmittel. In der gewählten Modellnomenklatur beschreiben  $VG^{ein}$  und  $VG^{aus}$  allgemeine Gruppen von Verkehrsmitteln, sofern das zu modellierende Szenario keine weite Unterscheidung benötigt. Durch die weitere Differenzierung nach  $VG^{Zein}$ ,  $VG^{Zaus}$ ,  $VG^{Sein}$ ,  $VG^{Saus}$ ,  $VG^{Lein}$  und  $VG^{Laus}$  könnten die allgemeinen Verkehrsmittelgruppen weiter unterschieden werden.

Das entwickelte allgemeine Automobilterminalmodell kann alle geforderten Modellanforderungen abdecken. Die folgende Gegenüberstellung bestätigt dies:

- 1) Ein Vergleich der definitorischen Basiselemente eines Automobilterminals mit dem entwickelten generischen Modell zeigt, dass das Modell die essenziellen strukturellen Aspekte abbilden kann. Es umfasst neben den Lagerflächen entsprechende Fahrwegeverbindungen und bietet die Möglichkeit über Quellen und Senken die Ankunft von Fahrzeugen und Verkehrsmitteln abzubilden.
- 2) Das Modell kann die relevanten logistischen Objekte, wie Fahrzeuge und Verkehrsmittel abbilden. Hinsichtlich der Verkehrsmittel ist eine weitere Differenzierung

---

nach Schiff, Bahn und Lkw möglich. Durch das Modell kann das relevante Verhalten der Objekte abgebildet werden.

- 3) Durch den hohen Detailgrad können bestehende Planungsmethoden direkt angewendet werden. Die jeweiligen Objektvolumina können, wie für die Verfahren benötigt, in Gruppen unterschieden werden. Gruppierungsmöglichkeiten bestehen sowohl für die Fahrzeuge als auch für die Verkehrsmittel. Insbesondere der analoge Aufbau von strukturellen Teilstücken des Modells zu bestehenden Problembeschreibungen ermöglicht die Anwendbarkeit bestehender Methoden.
- 4) Definitionsgemäß zielt die Selbststeuerung auf die Übertragung von systemischen Entscheidungskompetenzen auf einzelne Objekte. Die feine Betrachtungsgranularität des Modells erlaubt eine Abbildung von einzelnen Objekten (Fahrzeuge oder einzelne Verkehrsmittel) und ermöglicht die Modellierung von verschiedenen Entscheidungsmechanismen direkt auf der Objektebene.
- 5) Die dynamische Komplexität von Terminals wird, wie beschrieben, durch interne Faktoren (primär durch die nötige Differenzierung von Fahrzeuggruppen in der Lageraufstellung) sowie durch externe Faktoren (zeitliche Verteilung von ankommenden und abgehenden Volumen) bestimmt. Hinsichtlich der externen Faktoren bietet das Modell durch die Modellierung, das Verhalten der Quellen und der Senken (u.a. Ankünfte von Schiffen) die Integration verschiedener Grade von dynamischer Komplexität zu variieren. Sowohl rein deterministische Modelleinlastungen als auch nicht-lineare oder stochastisches Zu- und Abgangverhalten sind modellierbar.
- 6) Das Modell kann genutzt werden, um Szenarien beliebiger struktureller Komplexität abzubilden. Über die Parameter der Anzahl Flächen, der Ausbreitung der einzelnen Flächen, der Reihenanzahl, können Szenarien beliebiger Größe generiert werden. Auch hinsichtlich der Quellen und Senken sind Szenarien frei konfigurierbar.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass das generische Modell die formulierten Anforderungen erfüllt und verschiedene Terminalszenarien abbilden kann. Wie bereits beschrieben, werden personaldispositive Problemstellungen in dieser Arbeit nicht adressiert. Folglich beinhaltet das Terminalmodell keine Elemente für Fahrer und entsprechende Shuttles. Für die Anwendung auf solche Fragestellungen könnte das Modell aber entsprechend leicht erweitert werden. Die weiteren Betrachtungen in dieser Arbeit werden die verfügbare Personalkapazität nicht weiter berücksichtigen und sie daher als unbegrenzt ansehen.

---

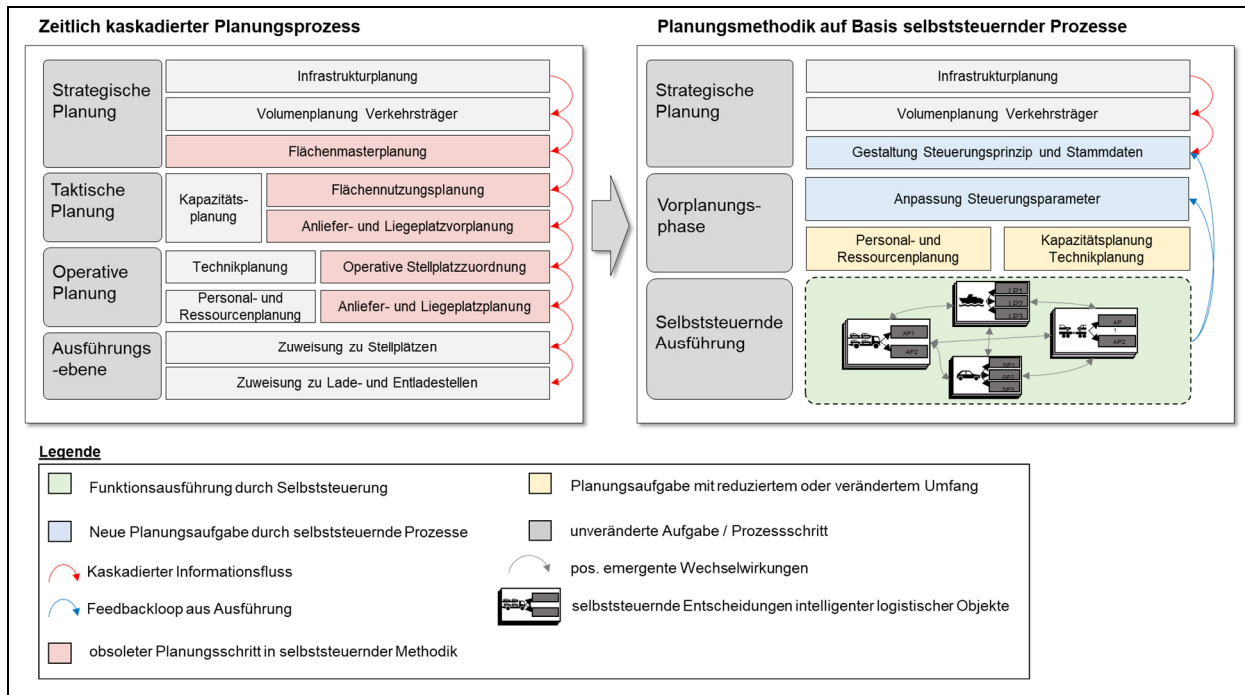
## **5. Entwicklung einer Planungsmethodik auf der Basis selbststeuernder Prozesse**

Dem der Arbeit zugrundeliegenden SE-Vorgehensmodells haben die vorangegangenen Analysen im Rahmen der Hauptstudienphase die forschungsleitenden Arbeitshypothesen bezüglich der temporalen Inflexibilität des kaskadierten Planungsprozesses bestätigt. Im Rahmen der Synthese von Lösungen leitet Kapitel 5.1 ein Zielbild für eine neue Terminalplanungsmethodik auf der Basis von selbststeuernden logistischen Prozessen ab. Auf dieser Grundlage thematisiert Kapitel 5.2 die Auswahl Selbststeuerungsansätze, welche für die vorgeschlagene Planungsmethodik geeignet sind und beschreibt konkrete Implementierungsansätze für entsprechende Methoden in den Kapiteln 5.3 und 5.4. Abschließend werden die Rahmenbedingungen für eine stufenweise Evaluation der neuen Planungsmethodik in Kapitel 5.5 thematisiert. Im Zuge der Evaluation ist nachzuweisen, dass die neue Planungsmethodik auf Basis von selbststeuernden logistischen Prozessen die Schwachstellen der kaskadierten klassischen Planung überwinden kann.

### **5.1 Ableiten einer neuen Planungsmethodik**

Die Analyse der Terminalplanungsprozesse im Allgemeinen und auch die Untersuchung der Ausgangslage an dem Beispielterminal haben gezeigt, dass der zeitlich kaskadierte Planungsprozess und die hiermit verbundene Vulnerabilität der Teilpläne gegenüber dynamischen und komplexen Rahmenbedingungen wesentliche Schwachstellen der klassischen Terminalplanungsprozesse sind. Die Überlegungen im Rahmen der Vorstudie haben bestätigen, dass die Einführung von selbststeuernden logistischen Prozessen grundsätzlich geeignet sein kann, um die Folgen der temporalen planerischen Abhängigkeiten zu überwinden. Eine sinnvolle Einbindung lokaler Selbststeuerungsprozesse auf der Ausführungsebene erfordert umfassende Anpassungen der zugrundeliegenden Terminalplanungsmethodik. Hierfür zeigt die folgende Abbildung 40 eine neue Planungsmethodik, welche den konventionellen kaskadierten Planungsprozess (siehe auch Abbildung 20) durch einen gezielten Einsatz von Selbststeuerung aufbricht. Aus Gründen der besseren Vergleichbarkeit stellt die Abbildung 40 die neue Methodik dem klassischen kaskadierten Prozess gegenüber.

Zentrales Element der neuen Planungsmethodik ist der Einsatz von selbststeuernden logistischen Prozessen auf der Ausführungsebene. Vergleichbar zu der Transition der Automatisierungspyramide in der Produktionslogistik (Burger et al., 2017; Grefen und Strommer, 2020), ermöglichen die vernetzten autonomen Prozesse auf der Ausführungsebene einen höheren Grad an direkter Kommunikation zwischen den zu Planungsobjekten und erfordern weniger planerische Vordisposition auf zeitlich vorgelagerten Ebenen.



**Abbildung 40: Planungsmethodik auf Basis selbststeuernder Prozesse**

Elementare Voraussetzung der vorgeschlagenen Planungsmethodik ist eine zielgerichtete Gestaltung der zugrundeliegenden Selbststeuerung, sodass bisher kaskadierte Planungsschritte direkt in die Steuerungsebene integriert werden können. Folglich ist für eine praktikable Umsetzbarkeit dieser Planungsmethodik die Frage nach der Gestaltung einer geeigneten Selbststeuerungsmethode von integraler Bedeutung. Konkret soll die vorgeschlagene neue Planungsmethodik die identifizierten Schwachstellen des kaskadierten Planungsprozesses (vorzeitige mehrschrittige Flächenallokation im Zuge der Flächenmasterplanung und die längerfristige Verkehrsträgerplanung) zeitlich vertikal auflösen. Hierfür identifiziert die Abbildung die Planungsaufgaben in dem klassischen Planungsansatz, welche durch eine selbststeuernde Planungsmethodik direkt durch die Selbststeuerung übernommen werden sollten und somit zukünftig obsolet sind (rote Markierung). Die Abbildung zeigt, dass durch den Wegfall der obsoleten Planungsaufgaben der kaskadierte Prozess aufgelöst wird. Weiterhin wurde im Zuge der Anforderungsdefinition in Kapitel 4 erkannt, dass eine bessere horizontale Integration der Verkehrsträger- und Lagerzuordnungsprozesse deutliche Leistungssteigerungspotenziale birgt. Diese horizontale Integration soll durch das positiv-emergente Ineinandergreifen von selbststeuernden Entscheidungen der verschiedenen intelligenten logistischen Objekte (z.B. Pkw oder Schiff) erreicht werden. Folglich zielt die in der Abbildung 40 dargestellte Planungsmethodik auf eine zeitlich vertikale Integration von Planungsschritten sowie auf die horizontale Integration von Prozessschritten. Die vorgeschlagene Methodik fokussiert auf die Beherrschung der identifizierten Schwachstellen in dem klassischen kaskadierten Planungsprozess. Trotz der grundlegenden

---

Veränderungen, welche mit der neuen Methodik verbunden sind, bleiben Planungsaufgaben auf der strategischen Ebene unverändert bestehen. Diese Planungsschritte definieren den langfristigen Rahmen, indem beispielsweise durch die Infrastruktur- und Volumenplanung sichergestellt wird, dass die ankommenden und abgehenden Fahrzeugmengen grundsätzlich nicht die Terminkapazität überschreiten. Eine weitere temporale Differenzierung der folgenden Planungsphasen (taktische und operative Planung) ist wegen des Wegfalles der aufeinander aufbauenden Planungsschritte nicht mehr notwendig. Daher fasst die Abbildung 40 alle weiteren unterstützenden Aufgaben in der Vorplanungsphase zusammen. Auch in der neuen Methodik legt die Personal- und Ressourcenplanung die notwendige personelle Zusammensetzung für die Prozessausführung fest und die Kapazitätsplanung für die Technikbearbeitung beschreibt die Zusammensetzung der zu bearbeitenden Technikaufträge. Hierbei sind notwendige Anpassung in diesen Schritten gegenüber dem klassischen Prozess zu erwarten, da durch die Selbststeuerung gesteigerten Prozessproduktivitäten in der Planung zu berücksichtigen sind (gelbe Markierung).

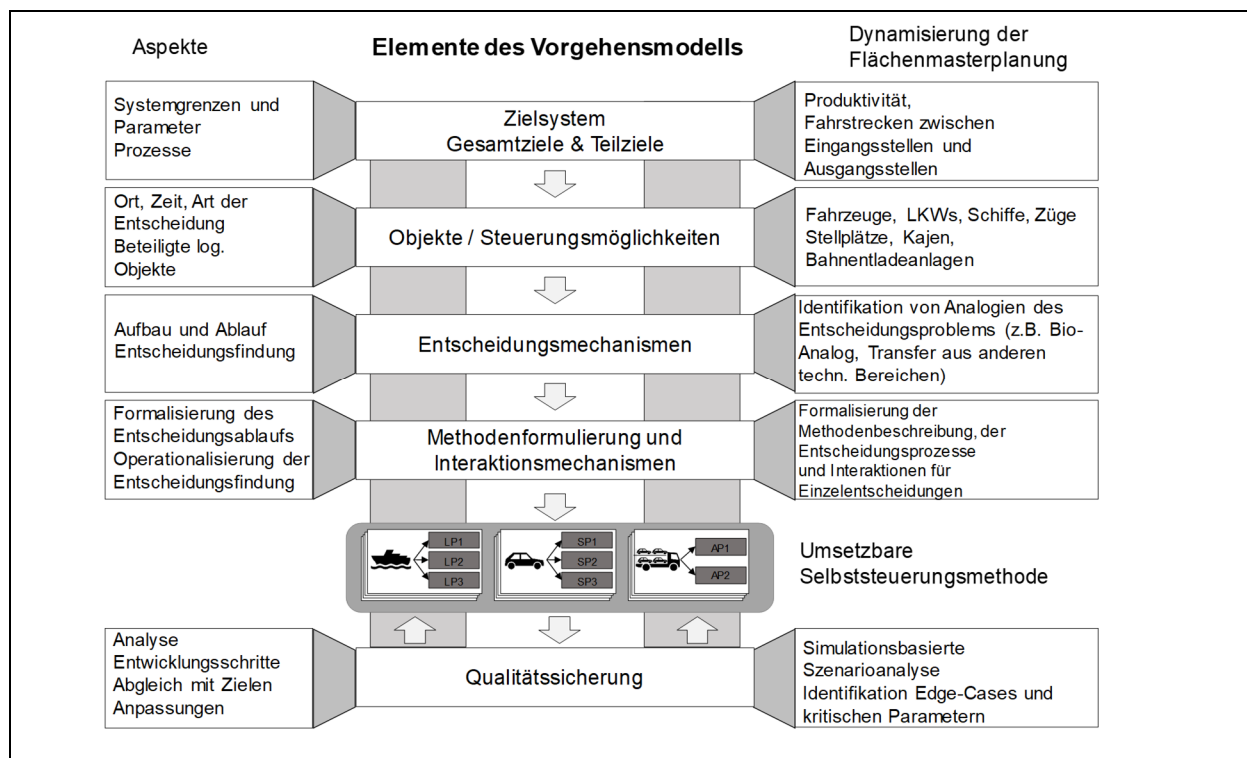
Neben diesen bestehenden und veränderten Aufgaben sieht die Planungsmethodik neue unterstützende Tätigkeiten, beispielsweise bezüglich der Parametrisierung der zugrundeliegenden Selbststeuerung, vor. Auf strategischer Ebene sind zunächst der Zuschnitt der selbststeuernden Prozesse, die Gestaltung Selbststeuerungsmethoden und die grundsätzliche Parametrisierung in Form geeigneter Stammdaten vorzunehmen. Auf der Grundlage von Feedbacks aus den selbststeuernden Prozessen können diese Parameter turnusmäßig neu eingestellt oder verändert werden. In einer weniger langfristigen Ausrichtung können die gewählten Steuerungsparameter im Zuge der Vorplanungsphase angepasst werden. Diese kleineren Konfigurationsänderungen basieren ebenfalls auf dem Leistungsfeedback der ausführenden selbststeuernden Prozesse. Diese zusätzlichen Anpassungsschritte setzen voraus, dass die Wirkung der Steuerungsparameter der Selbststeuerungsmethoden bekannt und in gewissen Rahmen vorhersagbar sind.

Im Folgenden wird ein selbststeuernder Ansatz für die Integration der Teilprobleme entwickelt. In diesem Kapitel 5.2 werden zunächst denkbare methodische Ansätze identifiziert und im Rahmen des SE-Prinzips der Entwicklung von Lösungsvarianten gegenübergestellt. Ziel dieser Gegenüberstellung ist die Festlegung auf ein geeignetes Selbststeuerungsfunktionsprinzip, um dieses anschließend auf das unter Kapitel 4 beschriebene Planungsproblem konkret auszugestalten. Hierbei wird auf das bereits betrachtete Vorgehensmodell zur Entwicklung von Selbststeuerungsmethoden zurückgegriffen und auf die Anwendung für Terminalfragestellungen entsprechend adaptiert. Nach der Evaluation der Steuerungsverfahren und der Planungsmethodik werden die in der

Abbildung 40 gezeigten Elemente in Bezug zur konkret ausgestalteten Selbststeuerung abschließend detailliert diskutiert.

## 5.2 Auswahl geeigneter Selbststeuerungsverfahren

Das allgemeine Vorgehensmodell für die Entwicklung von Selbststeuerungsverfahren bietet ein systematisches Vorgehen, welches das Zusammenwirken von Zielsystemen, beteiligten Objekten, den Selbststeuerungsmechanismen und den Interaktionsmechanismen berücksichtigt (Scholz-Reiter et al., 2011b). Die folgende Abbildung 41 zeigt eine für den Einsatz in Autoterminals adaptierte Version des Vorgehensmodells. Anhand dieses Modells sollen passende Selbststeuerungsmethoden für die neue Planungsmethodik entwickelt werden. Das Vorgehensmodell schlägt vor, zunächst das Zielsystem für das System näher zu spezifizieren.



**Abbildung 41: Entwicklungsvorgehensmodell für Selbststeuerung in Autoterminals (Görges und Freitag, 2019a)**

Für die Entwicklung einer neuen Planungsmethodik auf Basis von Selbststeuerung soll das bereits unter 4.2 herangezogene Zielsystem mit dem Fokus auf die Gesamtfahrstrecke der Fahrzeuge und den Sortiergrad genutzt werden. In einem zweiten Schritt sind mögliche Objekte für das Treffen von selbststeuernden Entscheidungen zu identifizieren und auszuwählen. Die Analyse der Terminalprozesse unter 3.2 zeigt, dass verschiedene Objekte als mögliche Entscheidungsinstanz in Betracht kommen können. Hierbei ist zwischen

---

beweglichen Objekten, Fahrzeugen, Schiffen, Zügen und Lkws und den betroffenen Infrastrukturelementen Stellplätze (oder Flächen), Kajen oder Gleisanlagen zu unterscheiden.

Die allgemeine Untersuchung von Selbststeuerungsmethoden hat gezeigt, dass in den überwiegenden Implementierungen die beweglichen Objekte als Entscheidungsträger fungieren. Auch im Hinblick auf die betrachteten Prozesse scheint eine Entscheidungsfindung der beweglichen Objekte intuitiv sinnvoll, da auch diese in den klassischen produktionslogistischen Anwendungsfällen der direkte Planungsgegenstand sind. In den Anforderungen an eine passende Lösung und der Problemformulierung (siehe Kapitel 4.1 und 4.2) wurde formuliert, dass Flächenallokationsentscheidungen mit den Verkehrsmittelallokationen abgestimmt werden sollten. Vor diesem Hintergrund scheint eine Beschränkung auf einzelne Objektklassen nicht sinnvoll. Vielmehr sollte der Selbststeuerungsansatz die folgenden Objektarten und Entscheidungen umfassen:

- Fahrzeuge: Auswahl von Lagerplätzen
- Verkehrsmittel (Bahn, Schiff, Lkw): Allokation für Lade- und Entladeprozesse

In einem nächsten Schritt sollen entsprechende Entscheidungsmechanismen ausgewählt werden. Die allgemeine Analyse bestehender Selbststeuerungsansätze hat bereits gezeigt, dass grundsätzlich verschiedene Methoden in Betracht kommen können (siehe Kapitel 2.6.2). Für die Auswahl eines geeigneten Prinzips soll die Taxonomie der Steuerungsmethoden aus 2.6 herangezogen werden. Die Abbildung 42 stellt die bekannten rationalen und gebunden rationalen Strategien den geforderten Zuordnungsfragestellungen gegenüber. Zudem zeigt die Abbildung die jeweiligen intelligenten logistischen Objekte, welche befähigt werden sollen, autonome Entscheidungen zu treffen. Die Abbildung zeigt eine systematische Einschätzung der Eignung der Ansätze für die Entscheidungssituationen. Die Begründung dieser Einschätzung wird im Folgenden vorgenommen. Für die Zuordnungsentscheidung der Verkehrsmittel im Ein- und Ausgang scheint das DLRP (Produktion) grundsätzlich geeignet, jedoch ist es als informationserkundende Methode eher für netzwerkartige Problemstellungen entwickelt worden. Daher kämen die Vorteile dieser Methode eher bei den vernetzten Fragestellungen der Technikzuweisung zum Tragen.

	intelligentes logistisches Objekt Entscheidungsgegenstand	Eingang			Lager		Ausgang		
		Schiff	Zug	LKW	Fahrzeug	Fahrzeug	Schiff	Zug	LKW
		Liegeplatz	Gleis	Entladestellen	Lagerflächen	Technikflächen	Liegeplatz	Gleis	Ladestellen
Selbststeuerungsprinzip Gebunden Rationale Methoden	DLRP Produktion	O	O	O	+	++	O	O	O
	DLRP Transport	--	--	--	--	--	--	--	--
	Terminreuemethode	-	-	-	--	O	-	-	-
	Gentelligent Parts	O	O	O	O	O	O	O	O
	Link-State internet routing protocol	O	O	O	O	O	O	O	O
	Warteschlangenvergleichsmethode	+	+	+	-	-	+	+	+
	Ameisen Algorithmen	++	+	++	++	++	++	+	++
	Bakterielle Chemotaxis	+	+	+	O	O	+	+	+
	Bienen Algorithmen	+	+	+	O	O	+	+	+
	Bionic manufacturing system	O	O	O	O	O	O	O	O
	Holonic manufacturing system	O	O	O	O	O	O	O	O
	Marktbasierter Steuerung	+	+	+	+	+	+	+	+

++ sehr geeignet  
 + geeignet  
 O neutral  
 - wenig geeignet  
 -- sehr wenig geeignet

**Abbildung 42: Potenzielle Eignung von Selbststeuerungsverfahren**

Eine vollumfängliche Übertragbarkeit der Erkundungsmechanismen scheint angesichts der verhältnismäßig geringen Anzahl von Entscheidungsalternativen nicht möglich. Anders verhält es sich bei dem DLRP (Transport). Es wurde für den Transport und die Konsolidierung von Gütern in transportlogistischen Szenarien entworfen. Da die betrachteten Terminalzuordnungsprobleme keine Ähnlichkeiten zu vehicle routing problemen (VRP) haben, scheint eine sinnvolle Übertragung des DLRP nicht möglich. Die Terminreue-Methode wurde für spezielle produktionslogistische Szenarien entworfen. Objekte, welche diese Methode nutzen, versuchen während der Bearbeitung in einer Produktionsanlage möglichst geringe Abweichungen zum geplanten Fertigstellungstermin zu realisieren. Diese Methode könnte für das Teilproblem der Zuordnung von Fahrzeugen zu Technikzentren geeignet zu sein, da eine Analogie zur Ausgangsfragestellung zu erkennen ist. Allerdings scheint ein Transfer zu den flächenbezogenen Terminalproblemen schwer darstellbar. Das unter 4.2 beschriebene Zielsystem fokussiert auf die Vermeidung von Fahrstrecken. Die Terminreue spielt eine nachgelagerte Rolle. Daher scheint eine Nutzung dieses Entscheidungsmechanismus nicht sinnvoll. Ähnlich ist die Übertragbarkeit für die Verkehrsmittelzuordnungen einzuschätzen. Auch hier wird die Produktivität maßgeblich durch die Fahrstrecken determiniert. Die Methoden Gentelligent Parts und Link-State internet routing protocol beschreiben weniger eine konkrete Methode, sondern mehr Frameworks, mittels derer rationale Entscheidungsmethoden umgesetzt werden können (Schmidt et al., 2007). Somit könnten sie grundsätzlich als technische Basis für die Entscheidungsfindung verwendet werden. Aufgrund der Generalität ihres Ansatzes wurden diese Methoden für ihre Anwendbarkeit als Entscheidungsmechanismus neutral eingeschätzt. Sie bieten konzeptionell die Möglichkeit,



---

Interaktionen zwischen intelligenten logistischen Objekten zu beschreiben. Hierbei können als Mechanismus die verschiedenen rationalen Methoden abgebildet werden.

Die höchste Eignung unter den rationalen Methoden ist bei der Warteschlangenmethode zu vermuten. Ursprünglich nutzt sie erwartete Warteschlangenlängen in Produktionsszenarien, um Maschinen für weitere Bearbeitungen auszuwählen. Dieser Mechanismus könnte konzeptionell leicht für die Verkehrsmittelzuordnung, beispielsweise durch Abschätzung der Fahrweglänge zu den Kaje, umgesetzt werden. Auch für die Flächenauswahl könnte dieses Prinzip genutzt werden, indem Fahrzeuge Flächen präferieren, welche mit kurzen Fahrwegen verbunden sind. Allerdings könnte eine solche einfache Methode nicht die beschriebene Gruppierung und Sortierung von Fahrzeugen berücksichtigen. Da diese Methode sich grundsätzlich greedy (greedy: Algorithmeigenschaft „gierig“) verhält, ist zu erwarten, dass hierdurch die Lagerzuweisung implizit ineffizient organisiert werden würde. Zwar würden die Einzelentscheidungen für jedes Fahrzeug zu der aktuell kürzesten Strecke für das Fahrzeug führen. Insgesamt würde die Fahrzeugaufstellung, wegen der mangelnden Berücksichtigung der übrigen Rahmenparameter (u.a. Sortierung der Fahrzeuge) allerdings suboptimal verlaufen. Daher wird die Eignung dieser Methode für die Lager- und Technikzuordnung aus Sicht der logistischen Zielerreichung als nicht zielführend für die Zuordnung zu Lagerflächen gesehen.

Wie bereits unter 2.6 beschrieben, wird in der Literatur der Einsatz von gebunden rationalen Selbststeuerungsansätzen aufgrund der beobachteten Leistungsfähigkeit von rationalen Methoden kontrovers diskutiert. (Martins, L. et al., 2020). Anhand von Simulationsstudien wurden verschiedene produktionslogistische Szenarien (flexible flow shop, bzw. general flexible flow shop) mit verschiedenen rationalen und gebunden rationalen Methoden untersucht. In diesen Studien führen die rationalen Strategien grundsätzlich zu besseren Ergebnissen (Scholz-Reiter et al., 2010; Martins, L.M. et al., 2020). So führen Martin et al. (2020) an, dass bio-analoge Methoden aufgrund ihres inhärenten Vergangenheitsbezugs schlechter zukünftige Situationen antizipieren können und daher in Situationen mit nahezu vollständigen Informationen eine geringere Leistungsfähigkeit besitzen. Diese Argumentation ist nachvollziehbar, aber nicht analog auf Autoterminals anwendbar. Durch die Rolle des Terminals als Entkopplungspunkt ist ein hoher Grad an unvollständigen Informationen ein integraler Bestandteil der Terminalplanungsprobleme. In diesem Umfeld können die gebunden rationalen Methoden einen Vorteil besitzen. Sie benötigen konzeptionell keine im Voraus bekannten Informationen und stellen somit eine vielversprechende Klasse für Entscheidungssituationen mit unsicherer Informationslage dar. In diesem Zusammenhang weisen insbesondere Ameisenalgorithmen eine hohe potenzielle Eignung aus. Sie befähigen intelligente logistische Objekte zur Entscheidungsfindung anhand von Informationen, die

---

frühere Objekte hinterlassen haben. Für die Wahl eines Lagerplatzes könnten Fahrzeuge als intelligente logistische Objekte Informationen über Fahrwege zu verschiedenen Reihen als künstliche Pheromone hinterlassen. Nachfolgende Fahrzeuge könnten dann anhand dieser Informationen Entscheidungen für passende Lagerreihen treffen. Anders als bei den rationalen Methoden könnten auch weitere Entscheidungskriterien, wie der Sortiergrad oder die FIFO-Einhaltung als künstliche Pheromone transkribiert werden. Bezüglich der geforderten Verkehrsmittelzuordnung sind ebenfalls pheromonbasierte Ansätze gut vorstellbar. In ähnlicher Weise kann auch die Zuordnung von Verkehrsmittel zu Be- und Endladepunkten (z.B. Liegeplätze) unterstützt werden. Denkbar ist eine Transkription von Informationen von vergangenen Be- und Entladevorgängen für die jeweiligen Verkehrsmittel. So könnten beispielsweise Informationen über realisierte Fahrwege zu einem Eingangs- oder Ausgangspunkt als künstliche Pheromone genutzt werden. Die Eignung kann grundsätzlich für alle eingehenden und ausgehenden Verkehrsmittel gesehen werden. Hierbei beruht die leichte Einschränkung in Abbildung 42 bei den Gleisein- und ausgängen nicht auf konzeptionellen Überlegungen, sondern auf praxisnahen Erkenntnissen aus dem betrachteten Terminalbeispiel. In der Regel sind Gleisankünfte häufig langfristig (teils vertraglich) festgelegt und werden daher selten verändert.

Die Einschätzung von Methoden auf der Basis von bakterieller Chemotaxis und Bienenalgorithmen sind ähnlich zu den Ameisenalgorithmen. Auch sie könnten potenziell anwendbar sein. Allerdings ist die Analogie zwischen den bisher in der Literatur dokumentierten Implementierungen und den Lager- und Technikzuordnungsproblemen nicht so naheliegend wie bei denen zu den Ameisen-Algorithm. Daher werden diese als leicht besser geeignet eingeschätzt. Dennoch scheinen eine artifizielle Repräsentation der Zielgrößen Sortiergrad und Fahrstrecken sowohl für eine chemotaxis-basierte Steuerung als auch für einen Bienenalgorithmus umsetzbar. Wie bei den rationalen Methoden beschreiben die Konzepte bionic manufacturing system (BMS) und holonic manufacturing system (HMS) konzeptionelle Ansätze zur Gestaltung von jeweils gebunden rationalen Entscheidungssystemen. Aufgrund ihrer generischen Ausrichtung wurden sie als neutral bewertet. Marktbasierte Verfahren können für die beschriebenen Zuordnungsprobleme anwendbar sein. Sie erlauben, durch die Monetarisierung von Zielsystemen und Variablen, eine Berücksichtigung vielfältiger Zielgrößen. Für eine sinnvolle Abbildung von Preisbildungsmechanismen sind allerdings auch die Integration von aktuellen und zukünftigen Informationen notwendig. Dies steht dem Grundproblem der Informationsverfügbarkeit entgegen. Daher wird die Eignung dieses Entscheidungsmechanismus nur als bedingt positiv eingeschätzt.

---

Auf der Grundlage dieser Vorüberlegungen wird als potenziell passendes Verfahren sowohl für die Lager- als auch für die Verkehrsmittelzuordnung die Entwicklung eines pheromonbasierten Ameisen-Algorithmus favorisiert. Daher werden im Folgenden gemäß der Logik in Abbildung 41 pheromonbasierte Ansätze für die Lagerplatzzuordnung und die Verkehrsmittelzuordnung formuliert.

### **5.3 Pheromonbasierte Selbststeuerungsmethode für die Lagerzuordnung**

Das Prinzip der bisher bekannten pheromonbasierten Steuerungsansätze basiert auf der Idee, das Nahrungssuchverhalten von Ameisenkolonien nachzuahmen. In dem natürlichen Prozess markieren Ameisen auf der Nahrungssuche die Wege zwischen potenziellen Futterquellen und ihrem Nest mit natürlichen Duftstoffen (Pheromonen). Die Wahrscheinlichkeit der Bewegung eines Individuums in eine bestimmte Richtung ist dabei abhängig von der Pheromonkonzentration an der jeweiligen Stelle. Je höher die Konzentration, desto wahrscheinlicher ist eine Bewegung in diese Richtung. Hierbei hinterlassen die Ameisen selbst Pheromone und erhöhen somit die Konzentration auf diesem Pfad. Da sich die Pheromone mit einer natürlichen Evaporationskonstante verflüchtigen, sinkt die Konzentration im Verlauf der Zeit, sofern sie nicht durch weitere nachfolgende Ameisen erneuert wird. Dies hat zur Folge, dass Routen zu besonders nahegelegenen Futterquellen Pfade mit einer hohen Konzentration aufweisen, während weiter entfernte Ziele durch schwächere Konzentrationen markiert und somit seltener besucht werden (Van Dyke Parunak, 1997; Bonabeau et al., 1999).

Durch dieses Grundverhalten können effiziente Routen durch die Ameisen etabliert und dynamisch verändert werden, ohne dass eine zentrale Instanz über Informationen bezüglich der Art und der Lage der Futterquellen verfügen muss. Dieses Grundmuster wurde im produktionslogistischen Kontext in unterschiedlichen Implementierungen adaptiert (Monmarché et al., 2000; Mullen et al., 2009). Hierbei abstrahieren diese Methoden das natürliche Grundprinzip, indem sie Werkstücke als intelligente logistische Objekte befähigen, Informationen über eigene Bearbeitungs- und Wartezeiten an alternativ zur Verfügung stehenden Produktionsressourcen als künstliches Pheromon zu hinterlassen. Nachfolgende Objekte können diese künstlichen Pheromonkonzentrationen lesen und sich anhand der Konzentration für eine Alternative entscheiden. Anders als in dem natürlichen Prozess wird die Verdunstungskonstante als variabler Parameter modelliert, indem nicht die gesamte Historie an Warte- und Bearbeitungszeiten für die Berechnung der Pheromonkonzentration herangezogen wird, sondern lediglich ein gleitender Durchschnitt über die letzten Teile (Armbruster et al., 2006; Scholz-Reiter et al., 2008a). Durch die Wahl der Anzahl Teile für die Durchschnittsbildung kann definiert werden, wie stark der Vergangenheitsbezug der Methode ist. Bei kleinen Werten werden nur aktuelle Daten berücksichtigt, während größere Werte eine

größere historische Rückschau zulassen. Üblicherweise wurde in einigen Implementierungen ein weiterer Parameter für die Modellierung von bewussten, abweichenden Entscheidungen eingeführt. So werden Möglichkeiten für das zufällige Erkunden neuer Pfade geschaffen. Ein Wahrscheinlichkeitsparameter legt fest, wie häufig bewusst eine Alternative mit einem geringeren Pheromonwert gewählt wird (Armbruster et al., 2006).

Für die Wahl eines Lagerplatzes in einem Autoterminal kann eine ähnliche pheromonbasierte Entscheidungsfindung modelliert werden. Hierbei können die Fahrzeuge als intelligente logistische Objekte agieren und selbststeuernde Entscheidungen für die Auswahl eines Lagerplatzes treffen. Die Gesamtheit der Fahrzeuge kann hierfür in beliebig viele Gruppen (z.B. HMD-Mix) unterteilt werden. Für die Lagerplatzzuordnung muss sich ein Fahrzeug für eine passende zur Verfügung stehende Lagerreihe entscheiden. Im Zuge der Entscheidungsfindung kann es die Pheromonkonzentration aller alternativ verfügbaren Reihen für Fahrzeuge seiner Gruppe lesen und sich entsprechend für die Reihe mit der höchsten Konzentration entscheiden. Die Modellierung der künstlichen Pheromonkonzentration sollte die unter 4.1 beschriebenen Anforderungen und die unter 4.3 genannten Zielgrößen abbilden können, indem die zurückgelegten Fahrstrecken, der Sortiergrad der Fahrzeuggruppen, die Verteilung der Fahrzeuge und das FIFO-Prinzip bei der Einlagerung berücksichtigt werden. Diese Anforderungen bedingen, anders als bei bisherigen produktionslogistischen Problemstellungen, eine multikriterielle Zielwertabbildung. Die folgende Gleichung (8) beschreibt einen Ansatz für die Berechnung eines künstlichen Pheromonwerts, welcher als initialer Formalisierungsansatz nach der Abbildung 41 zu verstehen ist.

$$P_i^k = \gamma_1 \left| \frac{RANG(W_i^k)}{F} - \frac{RANG(G_k)}{K} \right| + \gamma_2 \frac{d_i}{D^k} + \gamma_3 \left( 1 - \frac{v_i^k}{V^k} \right) + \gamma_4 \frac{W_i^k}{\max(W^k)} \quad (8)$$

Die Gleichung beschreibt die Pheromonkonzentration ( $P_i^k$ ) für eine Lagerreihe  $i$  eines Fahrzeugs der Gruppe  $k$  als lineare Kopplung von vier gewichteten Termen, welche die jeweiligen Anforderungen aus der Flächenplanung adressieren sollen. Wie bei multikriteriellen Bewertungsverfahren in klassischen Optimierungsverfahren beschreiben die einzelnen Terme einen Wertebereich zwischen 0 und 1. Hierdurch soll sichergestellt werden, dass kein Term aufgrund von zufälligen Zahlenwerten einen anderen dominieren kann und somit zu ungewünschten Entscheidungsverhalten führt. Die Gewichtungsfaktoren ( $\gamma_1 - \gamma_4$ ) sind frei wählbar. Aufgrund des Wertebereichs der Terme, sollten auch sie in einem Bereich zwischen 0 und 1 gewählt werden, um eine ungewollte Entscheidungsdominanz zu vermeiden. Entsprechend der Gleichung (8) soll ein Fahrzeug die Konzentration für die verfügbaren Lageralternativen bestimmen und eine davon auswählen können. Eine vergleichbare Implementierung nutzen Görges und Freitag für die selbststeuernde Lagerplatzzuordnung

(Görges und Freitag, 2019b, 2020, 2022). Grundsätzlich erlaubt der Ansatz eine Unterscheidung nach Fahrzeuggruppen. Die Wahl der Gruppen kann beliebig modelliert werden. Je nach Anwendungsfall können die Gruppen beispielsweise nach dem HMD-Mix definiert werden. Die Bedeutung und die Berechnung der einzelnen Terme der Gleichung (8) werden im Nachfolgenden näher erläutert.

### 5.3.1 Term 1 – Lagerdauer und Lagerposition

Der erste Term zielt darauf ab, das Verhältnis zwischen Lagerdauer und den Fahrwegen einer Fahrzeuggruppe zu berücksichtigen. Wie auch in klassischen Lagersystemen ist hier das Ziel langsamere Umschlagsvolumen auf Flächen mit weiteren Fahrwegen zu binden und für hochfrequente Volumen möglichst kurze Fahrwege zu generieren. Rechnerisch sind weitere Schritte für die Bestimmung dieses Werts notwendig. Die Abbildung 43 zeigt alle Berechnungsschritte als Pseudocode.

Fahrzeug startet Entscheidung
Bestimme verfügbare Reihen
for i1 = Anzahl Fahrzeuge k downto $\alpha$
Addiere Standzeit von Fahrzeug i1
Berechne $G_k$
Aktualisiere Tabelle mit Standzeiten mit $G_k$
Sortiere Standzeitentabelle aufsteigend
Berechne $\text{Rang}(G_k) / K$
for i1 = Anzahl Fahrzeuge k downto $\alpha$
Zähle Eingänge für jeden Eingangspunkt Zähle Eingänge für jeden Ausgangspunkt
for i1 = 1 to F
Berechne Entfernung $W_i^k$ Schreibe $W_i^k$ Tabelle
Sortiere Reihentabelle aufsteigend
for i1 = 1 to F
Berechne $\text{Rang}(W_i^k) / F$ Berechne $\text{abs}(\text{Rang}(W_i^k) / F - \text{Rang}(G_k) / K)$ Schreibe Ergebnis in Tabelle

**Abbildung 43: Ablauf Berechnung Term Lagerdauer**

Der Term adressiert das Verhältnis zwischen der Lagerdauer einer Fahrzeuggruppe auf dem Terminal und den zu erwartenden Fahrstrecken für die Fahrzeuggruppe von dem am häufig genutzten Eingangspunkt über die zu bewertende Lagerfläche zum meistgenutzten Ausgangspunkt. Nachdem alle verfügbaren Reihen bestimmt wurden, werden in einer temporären Tabelle die Standzeiten der letzten  $\alpha$  Fahrzeuge der Klasse k bestimmt und ein

---

gleitender Durchschnitt  $G_k$  gebildet. Anschließend wird die global verfügbare Tabelle mit den Standzeiten aller Fahrzeugklassen aktualisiert und sortiert. Nach der Sortierung wird das Verhältnis Rangposition der Standzeit der aktuellen Fahrzeugklasse zur Anzahl aller Fahrzeugklassen  $K$  gebildet. Folglich hat die Gruppe mit der höchsten Standzeit hier einen Wert von 1 und die mit der niedrigsten Standzeit einen Wert von  $1/K$ . Nachdem die normierten Standzeitwerte berechnet wurden, werden die häufigsten Ein- und Ausgangspunkte für die Fahrzeugklasse  $K$  bestimmt.

Auch hierfür wird der gleitende Durchschnitt über die letzten  $\alpha$  Fahrzeuge gebildet. Anschließend wird die Fahrstrecke der Fahrzeuge vom wahrscheinlichen Eingangspunkt zum häufigsten Ausgangspunkt über die Nutzung der Reihe  $i$  berechnet und in der Tabelle gespeichert. Mittels dieser Werte wird die Rangposition der Reihen für die Klasse  $k$  ermittelt und zur Anzahl der verfügbaren Reihen ins Verhältnis gesetzt. Im letzten Berechnungsschritt wird der Betrag der Differenz zwischen den reihenbasierten normierten Entfernungswerten und der normierten Standzeit bestimmt.

### 5.3.2 Term 2 – Ankunftsreihenfolge

Wie bereits mehrfach beschrieben, werden Fahrzeuge auf Terminals üblicherweise nach dem FIFO-Prinzip durch die Kunden (OEMs oder Reeder) abgerufen. Folglich ist die Berücksichtigung dieses Prinzips eine wichtige Eigenschaft für eine mögliche Überführung in reale Anwendungen. Daher bewertet der zweite Term die bisherige Lagerdauer der Fahrzeuge. Für die Bewertung einer Reihe  $i$  wird das Verhältnis der Aufenthaltsdauer des letzten in der Reihe  $i$  abgestellten Fahrzeugs zur Verweildauer des ältesten Fahrzeugs der Klasse  $k$  gesetzt. Bei einer hohen Altersdifferenz wird dieser Term größer und die Bewertung einer Reihe somit tendenziell schlechter und umgekehrt. Sollte eine Reihe leer sein, wird der Wert für diese Reihe auf 0 gesetzt.

### 5.3.3 Term 3 – Sortierung der Fahrzeuge

Eine weitere wichtige Anforderung an eine Lösung ist die Einhaltung eines möglichst hohen Sortiergrads in den Reihen und in den Lagerflächen. Diesen Aspekt adressiert der dritte Term. Auch die Berechnung des dritten Terms ist im Vergleich zum ersten Term verhältnismäßig einfach. Er ist definiert als die Anzahl Fahrzeuge  $v_i^k$  in einer Reihe  $i$  (oder je nach Modellierung auch der Anzahl Fahrzeuge in einem Flächenbereich mehrerer Reihen) im Verhältnis zur Gesamtzahl der Fahrzeuge einer Klasse. Eine hohe Verdichtung der Fahrzeuge einer Klasse führt zu hohen Werten und umgekehrt. Da alle Terme eine bessere Reihenbewertung bei einem geringen Zahlenwert zur Folge haben, wird dieses Verhältnis als Residualwert aus der Subtraktion mit 1 berechnet. Somit führen gute Sortierwerte zu einem niedrigen Zielwert.

---

#### 5.3.4 Term 4 – Fahrwege

Der erste Term adressierte bereits die Fahrwege der Fahrzeuge. Allerdings mit dem Fokus, die Nutzung der Flächen möglichst ausgewogen im Verhältnis zu den erwarteten Standtagen zu ermöglichen. Rein konzeptionell ist der erste Term nicht direkt auf die Fahrwegreduktion ausgerichtet. Diese Funktion übernimmt der vierte Term. Er bildet das Verhältnis Fahrstrecke  $W_i^k$  zu der maximal möglichen Fahrstrecke  $\max(W_i^k)$  einer Fahrzeuggruppe  $k$ . Die entsprechenden Entfernungen werden hierbei analog zu dem Vorgehen in Abbildung 43 bestimmt. Sie beziehen sich auf die am häufigsten genutzten Ein- und Ausgänge der letzten  $\alpha$  Fahrzeuge. Auch hier werden die Entfernungen von den häufigsten Eingangspunkten über die jeweils verfügbaren Lagerreihen zu den meistgenutzten Ausgangspunkten verwendet.

#### 5.3.5 Zusammenfassung der pheromonbasierten Lagerzuordnung

Die Gleichung (8) beschreibt, wie eine künstliche Pheromonkonzentration für die Lagerplatzauswahl modelliert werden kann. Hierbei wird durch diese Gleichung für jede Fahrzeuggruppe und für jede Reihe des Lagers ein entsprechender Pheromonwert berechnet. Anders als bei ihrem natürlichen Vorbild beschreibt ein niedriger Pheromonwert die bevorzugten Lagerreihen. Die Analogie zwischen dem Pheromonwert und der Konzentration natürlicher Pheromone wird antiproportional beschrieben. Wie ausgeführt ist aus mathematischer Sicht sichergestellt, dass alle Terme denselben Wertebereich besitzen. Somit sollte in Abhängigkeit des Einsatzszenarios eine Ausrichtung auf die konkrete Zielstellung mit den verfügbaren Gewichtungsfaktoren möglich sein. Durch die Verwendung von gleitenden Durchschnitten über die letzten  $\alpha$  Fahrzeuge besitzt der Ansatz einen Evaporationsmechanismus, analog zu den Implementierungen für die Produktionslogistik. Hierbei ist zu vermuten, dass der Evaporationsparameter ein Einfluss auf die Methodenleistung haben wird. Die Absicherung dieser Vermutungen stellt ein wichtiges Ergebnis des Qualitätssicherungsschrittes nach Abbildung 43 dar.

### 5.4 Pheromonbasierte Selbststeuerungsmethode für die Verkehrsmittel

Bei der Analyse der Liegeplatzplanungsalgorithmen wurde erkannt, dass sich die meisten Ansätze auf eine Reduktion der logistischen Zuführungstrecken vom, bzw. zum geplanten Lagerort fokussieren. Dieses Grundprinzip scheint auch angesichts der genannten Anforderungen und des bestehenden Zielsystems sinnvoll und leicht in einen ähnlichen pheromonbasierten Ansatz integrierbar. Die Gleichung (9) zeigt einen übergreifenden Ansatz für eine pheromonbasierte Entscheidungsfindung von Verkehrsmitteln. Dieser Ansatz fokussiert bewusst nicht nur auf ein Transportmedium, sondern ist prinzipiell auf alle Verkehrsmittel anwendbar (Schiffe, Bahn, Lkw).

---

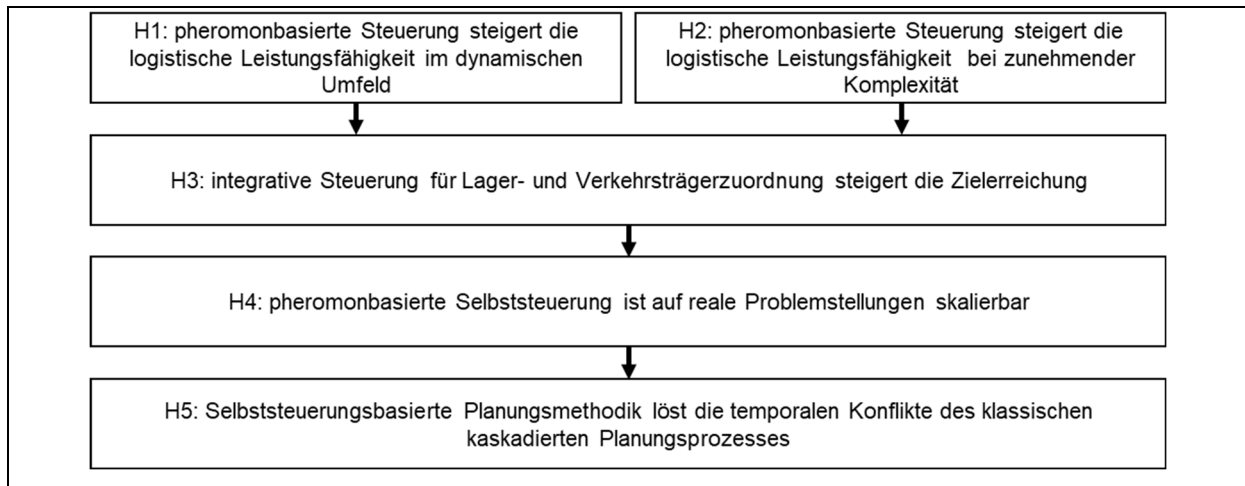
$$S_l^i = \frac{W_l^i}{\alpha_V} \quad (9)$$

Im Vergleich zu der Lagerzuordnung ist die Umsetzung der Verkehrsmittelentscheidung verhältnismäßig einfach. Wie schon bei der Analyse der Planungsprobleme unter 2.5 beschrieben, wirkt die Verkehrsmittelzuordnung lediglich auf die Fahrstrecken der Fahrzeuge. Andere Größen, wie die Flächensortierung oder die Einhaltung des FIFO-Prinzips werden nicht berührt. Daher bezieht sich der Pheromonwert für die Verkehrsmittelauswahl auf die mit der Allokationsentscheidung verbundenen Fahrstrecken zwischen den Lagerorten und den Lade- und Entladepunkten. Hierfür werden die Verkehrsmittel ähnlich wie die Fahrzeuge in Gruppen eingeteilt. Bei ein- und ausgehenden Schiffen könnte diese Gruppierung beispielsweise anhand der Liniendiensteinteilung oder der bedienten Reisedestinationen vorgenommen werden. Für jeden verfügbaren Ein- und Ausgangspunkt (z.B. Liegeplatz bei Schiffen)  $i$  wird ein entsprechender künstlicher Pheromonwert für die jeweilige Verkehrsmittelgruppe  $l$  berechnet. Hierbei ist dieser Wert der gleitende Durchschnitt der Fahrwege der letzten  $\alpha_V$  (der Index  $V$  dient der Unterscheidung der gleitenden Durchschnitte für die Verkehrsmittel- und der Lagerzuordnung) Fahrzeuge, welche mit dieser Verkehrsmittelgruppe bisher in oder aus dem Terminal transportiert wurden. Verkehrsmittel wählen anhand dieser Methode den Entladepunkt mit dem geringsten Pheromonwert. Görges und Freitag (2022) nutzen diesen Ansatz für die selbststeuernde Liegeplatzplanung (Görges und Freitag, 2022). Auch hier ist der Analogieschluss zwischen künstlichen und natürlichen Pheromonen antiproportional. Wie bei der Lagerzuweisung wird die Evaporation über den gleitenden Durchschnitt der letzten Fahrzeuge einer Verkehrsmittelgruppe vorgenommen.

## 5.5 Hypothesen für die Evaluation

Die neue Planungsmethodik auf Basis von pheromonbasierten Steuerungsmethoden wurde, dem SE-Vorgehensmodell folgend, als mögliche Lösungsalternative im Zuge der Hauptstudie für das in der Vorstudie beschriebene Problem entwickelt. Als nächster Schritt des SE-Problemlösungszykluses werden die entwickelten Lösungen analysiert und bewertet. Die Abbildung 40 zeigt, dass die entwickelten Selbststeuerungsmethoden den Kern der neuen Planungsmethodik bilden. Soll im Zuge der Evaluation die Funktionsfähigkeit der Planungsmethodik nachgewiesen werden, so ist zunächst im Detail die Wirksamkeit der zugrundeliegenden Selbststeuerung zu untersuchen. Ohne die gewünschten Wirkungen der Selbststeuerung im Hinblick auf die logistische Leistungsfähigkeit, den Umgang mit Dynamik und Problemkomplexität ist neue Planungsmethodik nicht sinnvoll anwendbar. Daher fasst die Abbildung 44 als Grundlage für die Evaluation fasst die zu analysierenden Fragestellungen in Form von Hypothesen zusammen.





**Abbildung 44: Evaluationshypothesen**

Die Hypothesen resultieren aus den ursprünglichen Arbeitshypothesen, den identifizierten Schwachstellen und den Anforderungen an eine mögliche Lösung. Die grundlegenden Hypothesen H1 und H2 resultieren aus den definierten Anforderungen an die Lösung. Sie postulieren, dass die neuen Steuerungsmethoden die Leistungsfähigkeit des Terminalsystems steigern (H1) und eine bessere Bewältigung von Dynamik und Komplexität ermöglichen (H2). Diese Hypothesen wurden bewusst so formuliert, dass sie die einzelnen Methoden für Lagerplatz- und Verkehrsmittelzuweisung separat betrachten. Erst die Hypothese H3 adressiert das integrierte Zusammenwirken beider Methoden. Die Hypothese besagt, dass eine Kombination beider Ansätze zu einer höheren Zielerreichung führt als die getrennte Nutzung. Die Hypothese H4 adressiert die Übertragbarkeit der neuen Selbststeuerung auf reale Terminals. Somit fokussieren die Hypothesen H1-H4 die Wirkung der neuen Selbststeuerungsmethoden. Um abschließend Rückschlüsse auf die neue Planungsmethodik ziehen zu können, ist für die gesamte Evaluation wichtig, dass die für den Vergleich genutzten konventionellen Methoden unter den kaskadierten Planungsrahmen fallen.

Nur sofern die Hypothesen H1-H4 verifiziert werden können, kann auch die zusammenfassende Hypothese H5 bestätigt werden. Die Hypothese H5 verdichtet die Ergebnisse und verlagert den Evaluationsfokus von Selbststeuerungsmethoden zu der gesamten Planungsmethodik. Sie postuliert, dass durch den Einsatz der neuen Planungsmethodik auf Basis von Selbststeuerung die Schwachstellen des klassischen kaskadierten Prozesses überwunden werden können. Eine Bestätigung dieser Hypothesen würde die Leistungsfähigkeit und die praxeologische Relevanz der neuen Methodik untermauern und zeigen, dass die Planungsmethodik unter realen Bedingungen anwendbar ist. Die Qualitätssicherung im Zuge der Hauptstudie wäre in diesem Fall erfolgreich abgeschlossen.

---

## 6. Evaluation der Planungsmethodik auf Basis selbststeuernder Prozesse

Die Evaluation wird von den fünf Hypothesen in der Abbildung 44 geleitet. Sie sollen durch die Evaluation bestätigt oder verworfen werden. Da die Hypothesen auf unterschiedliche Argumentationsebenen abzielen, werden für die Evaluation unterschiedliche Simulationsmodelle herangezogen. Die H1, H2 und H3 sind allgemeingültig formuliert. Eine aussagekräftige Bestätigung kann folglich nicht an einer exemplarischen Probleminstanz erfolgen, sondern sie muss einen breiten Parameter- und Anwendungsbereich adressieren. Für diesen Zweck wird ein allgemeines skalierbares Simulationsmodell des in Kapitel 6.2 (siehe auch Abbildung 39) beschriebenen Terminalmodells umgesetzt und analysiert. Ein allgemeines Modell erlaubt, ein breites Parameterfeld zu analysieren und stellt eine spätere Reproduzierbarkeit der Ergebnisse sicher. Auch die Wirkzusammenhänge können aufgrund der fest definierten Input-Output-Beziehungen transparent untersucht werden. Durch den generischen Charakter des Modells kann leicht sichergestellt werden, dass die Vergleichsmethoden unter den Rahmenbedingungen des klassischen kaskadierten Planungsprozesse angewendet werden. Hinsichtlich der Hypothese H4 stoßen derartige generische Szenarien an eine natürliche Grenze. Daher wird für die Überprüfung von H4 ein weiteres realdatenbasiertes Simulationsmodell eingesetzt. Es bildet ein Beispielterminal und seine Volumenströme anhand von Realdaten detailliert ab. Durch die Nutzung von realen Daten ist die Sicherstellung der kaskadierten planerischen Rahmenbedingungen dem Modell inhärent, da das Beispielterminal in der gewählten Bezugsperiode wie unter 3.2 dargestellt mittels eines konventionellen kaskadierten Ansatzes geplant wurde. Folglich kann mithilfe dieser Beispielinstantz die Einsetzbarkeit in realen Terminalsystemen abgeschätzt werden. Auf dieser Grundlage kann schließlich die letzte Hypothese geprüft werden. Nur wenn die integrierte Steuerungsmethode unter dynamischen und komplexen Bedingungen leistungsfähiger ist als klassische Ansätze und eine Anwendbarkeit in realen Szenarien möglich ist, so kann H5 positiv beantwortet werden.

### 6.1 Analyse eines generischen Terminalmodells

In der folgenden Analyse werden verschiedene Instanzen des generischen Modells aus Kapitel 4.3 herangezogen, um Situationen verschiedener Dynamik und Komplexität abzubilden. Hierbei variieren sowohl die Anzahl und die Konfiguration der einzelnen Lagerflächen  $A_{nm}$ , der Quellen  $I_k$ , der Senken  $O_j$  und der entsprechenden Übertragungsfunktionen für Ein- und Ausgänge  $f_k^l(t)$  und  $f_k^o(t)$ . Um die Betrachtung in den generischen Szenarien möglichst einfach zu halten, wird bei allen Untersuchungen ein überschaubarer Materialfluss angenommen. Fahrzeuge erreichen das Terminal mit einem

---

Verkehrsmittel und verlassen es nach einer Lagerungsphase mit einem anderen Verkehrsmittel. Die Art der Verkehrsmittel (Bahn, Schiff oder Lkw) kann als beliebig wählbar angesehen werden, sie ist für die Evaluation in dem generischen Modell unerheblich. Für ein leichteres Verständnis wird allerdings im Folgenden angenommen, alle Fahrzeuge erreichen das Terminal per Bahn und verlassen es via Schiff. Dies erlaubt eine plastischere und weniger abstrakte verbale Beschreibung der Ergebnisse. Die Fahrzeuge werden in allen Szenarien anhand ihres HMD-Mixes in Gruppen eingeteilt. Die Ankunft von Fahrzeugen einer Gruppe wird als Sinusfunktion mit den folgenden Eigenschaften modelliert:

$$f_k^l(t) = \lambda^k + \mu^k \cdot \sin\left(\frac{t}{T} + \varphi^k\right) \quad (10)$$

In den Szenarien der Evaluation ist jedem Hersteller genau ein Ankunftspunkt (Gleis) zugeordnet. Die Ausgänge können je nach Verkehrsmittelzuweisung an allen Senken (Kajen) erfolgen. Die Verweildauer der Fahrzeuge variiert je nach HMD-Mix und wird in den Szenarien entweder deterministisch festgelegt oder durch eine Zufallsvariable (Gleichverteilung) modelliert. Hierbei beschreibt die Funktion in Gleichung (10) das tägliche Ankunfts-volumen einer Fahrzeuggruppe. Der Parameter  $\lambda^k$  bestimmt das mittlere tägliche Ankunfts-volumen der Klasse, während die Amplitude  $\mu^k$  die Schwankungsbreite des Volumens über die Zeit beschreibt. Die Phasenverschiebung  $\varphi^k$  bestimmt den zeitlichen Versatz der Sinusfunktion und der Parameter T definiert die Frequenz, bzw. die Periodenlänge, in dem die Funktion oszilliert. Die Modellierung mittels einer Sinusfunktion wurde gewählt, um typische Eingangsdynamiken (wie unter 3.3.2 gezeigt) abbilden zu können. Sie ermöglicht einerseits, die vorherrschende Einlastungsdynamik durch Parameter leicht einzustellen und ermöglicht andererseits durch die vollständige Beschreibbarkeit einen leichteren Analysezugang. Da die Szenarien Zufallsvariablen (u.a. für die Aufenthaltsdauer) nutzen, werden für jeden Parameterwert Szenarien zur Wiederholung der Simulationsläufe erzeugt. Die Anzahl Wiederholungen wurde je Szenario auf mindestens fünf Instanzen mit veränderten Seedwerten für die Zufallszahlengeneration je Parametervariation gesetzt. Die minimale Anzahl von fünf Läufen ist für die Analysen ausreichend, da alle Simulationsläufe als nicht terminierende Simulationen (vgl. (Banks, 2005)) modelliert werden. Die Laufzeit der Simulationsläufe ist auf 365 Tage angelegt. Hierbei umfassen alle Szenarien in dem generischen Modell mindestens 500.000 Fahrzeuge. Somit sind, sobald die Simulationen stationäre Zustände annehmen, entsprechende Wiederholungseffekte bereits innerhalb eines einzelnen Simulationslaufs gegeben.

Hinsichtlich der Abgänge der Fahrzeuge vom Terminal werden zwei Modi verwendet. Im ersten Modus werden Abgänge ausschließlich als gleichverteilte Zufallsfunktion mit vordefiniertem Mittelwert nach dem Eingang modelliert. In diesem abstrakten Modus werden

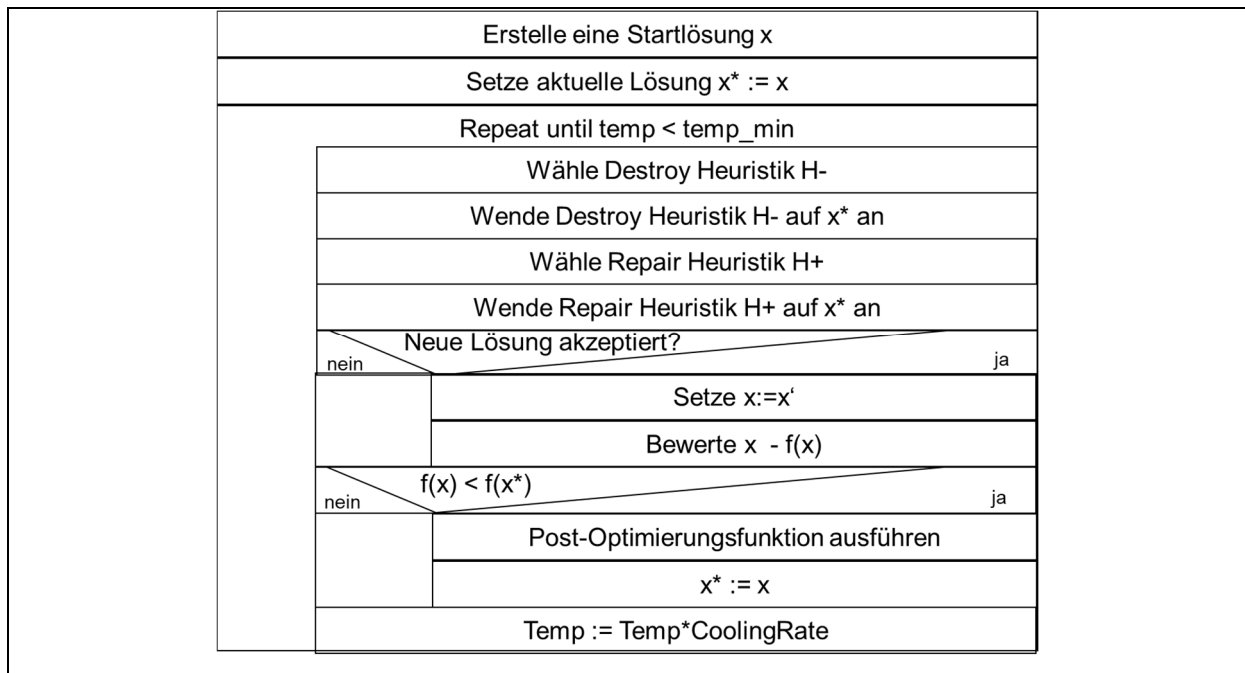
---

Schiffe nicht direkt modelliert. Die Fahrzeuge bewegen sich zu den definierten Zeitpunkten zu festen Ausgangspunkten. Der zweite Modus modelliert den schiffsweisen gebündelten Abgang von Fahrzeugen. In diesem Modus werden Schiffsankünfte mit entsprechenden Ladevolumen definiert. Das Ladevolumen kann über eine Normalverteilung eingestellt werden. Die durchschnittliche Liegezeit eines Schiffs wird durch eine wählbare Lade- und Löschezit je Fahrzeug bestimmt. Folglich ist die Liegezeit linear abhängig vom Fahrzeugvolumen des jeweiligen Schiffs.

### 6.1.1 Benchmarks für die Flächenplanung

Eine zentrale Arbeitshypothese basiert auf der Annahme, dass die neue Selbststeuerungsmethode für die Flächenzuordnung eine bessere logistische Leistungsfähigkeit unter komplexen und dynamischen Rahmenbedingungen erzielen kann als klassische Ansätze. Folglich sollten entsprechende klassische Planungsmethoden als Benchmark für die Evaluation der neuen Selbststeuerung herangezogen werden. In der Literatur sind nur sehr wenige Ansätze (siehe auch Kapitel 2.5) zu finden, welche die Zuordnung von Fahrzeugen zu Lagerflächen in Automobilterminals konkret beschreiben. Zwar existieren zahlreiche Ansätze für Flächenzuordnung in Containerterminals, welche allerdings nicht auf die Anforderungen von Automobilterminals übertragen werden können. Wie bereits beschrieben tangieren die Ansätze wie die von Fischer und Gehring (Fischer und Gehring, 2005, 2006), Mattfeld (Mattfeld, 2006), Mattfeld und Kopfer (Mattfeld und Kopfer, 2003) oder Cordeau et al. 2011 (Cordeau et al., 2011) teilweise die Problemstellung. Allerdings scheint lediglich der Ansatz von Cordeau et al. (2011) sinnvoll auf große realistische Szenarien anwendbar zu sein. Neben einer rein analytischen Vorgehensweise präsentieren Cordeau et al. eine Metaheuristik, welche auch größere Probleminstanzen lösen kann. Cordau et al. beschreiben weiterhin, wie die Heuristik als rollierender Algorithmus eingesetzt werden kann, um Instanzen zu lösen, welche sich über beliebig viele Planungszeithorizonte erstrecken. Aufgrund dieser Eigenschaften wird der Algorithmus von Cordeau et al. (2011) als zentraler Benchmark für die Flächenzuordnung implementiert. Im Folgenden wird der Algorithmus und seine Umsetzung im Rahmen dieser Arbeit beschrieben. Grundsätzlich zielt der Algorithmus darauf ab, Fahrzeuggruppen (beispielsweise gruppiert nach dem HMD-Mix) so auf den vorhandenen Lagerflächen zu platzieren, dass jede Gruppe einen möglichst kurzen Fahrweg von ihrer Quelle bis zur Senke hat. Hierbei sollen Fahrzeuge einer Gruppe  $k$  möglichst unterbrechungsfrei in aufeinander folgenden Reihen platziert werden. Die Fahrzeuge und Flächenkonfiguration weisen dabei die unter 4.3.3 beschriebenen Eigenschaften auf. Das Grundprinzip des Algorithmus wird in der Abbildung 45 illustriert. Ausgehend von einer Startlösung verfolgt der Hauptalgorithmus mittels eines simulated annealing (SA) Ansatzes die

iterative Verbesserung dieser Initiallösung. Hierbei werden abwechselnd sogenannte „Destroy“ (H<sup>-</sup>) und „Repair“ (H<sup>+</sup>) Unterheuristiken angewendet.



**Abbildung 45: Hauptschleife des Flächenzuordnungsalgorithmus nach (Cordeau et al., 2011)**

Die H<sup>-</sup> Heuristiken entfernen aus einer Lösung Zuordnungen von Fahrzeuggruppen zu Lagerreihen anhand definierter Regeln. Die H<sup>+</sup> Heuristiken ordnen die entfernten Gruppen neu an und erzeugen somit eine neue Lösung (bezeichnet mit x'). In dem Algorithmus stehen vier H<sup>-</sup> und zwei H<sup>+</sup> Heuristiken zur Verfügung. Die Auswahl der jeweiligen H<sup>-</sup> und H<sup>+</sup> erfolgt situativ anhand der vorherigen Lösungen. In einem weiteren Schritt wird die neue Lösung bewertet. Sollte sie besser sein als die beste bekannte Lösung x<sup>best</sup> oder als die aktuelle Lösung x' wird die neue Lösung akzeptiert und als neue aktuelle Lösung gespeichert. Sollte die Bewertung f(x') schlechter sein als die der aktuellen Lösung, greifen die Mechanismen der SA-Metaheuristik. Die neue Lösung wird als aktuelle Lösung (trotz Verschlechterung) akzeptiert, sofern eine gleichverteilte Zufallszahl r aus dem Intervall [0,1] kleiner ist als der Abkühlungsterm:

$$r < e^{-\frac{f(x^*) - f(x')}{T}} \quad (11)$$

Hierdurch werden zu Beginn des Algorithmus mit einer höheren Wahrscheinlichkeit Verschlechterungen angenommen. Die Temperatur T wird im letzten Schritt des Algorithmus mit einer definierten Abkühlungsrate verringert. Durch diese Abkühlung wird mit zunehmender Anzahl Algorithmdurchläufen die Wahrscheinlichkeit schlechtere Lösungen zu akzeptieren verringert. Der Algorithmus wird schließlich beendet, sobald eine vordefinierte Zieltemperatur

---

unterschritten wird. Die Abbildung 45 zeigt den sukzessiven Ablauf des Flächen-Zuordnungsalgorithmus.

Die Abbildung 45 zeigt allerdings nicht, wie die  $H^-$  und  $H^+$  Heuristiken gestaltet sind und wie die Auswahl der Heuristiken funktioniert. Die „Largest-out heuristic“ ist eine  $H^-$  bei der die Liste der Fahrzeuggruppen absteigend nach ihrer Größe geordnet wurde. Hierbei wird die Liste sukzessive abgelaufen. Solange noch keine Gruppe ausgewählt wurde, wird die aktuelle Gruppe mit einer vordefinierten Wahrscheinlichkeit  $p$  ausgewählt. Sobald eine Gruppe (Startgruppe) ausgewählt wurde, können folgende Gruppen aus der Liste nur noch zusätzlich ausgewählt werden, wenn sie zeitliche Aufenthaltsüberschneidungen mit der ersten ausgewählten Gruppe haben. Die Heuristik wird ausgeführt, bis eine vordefinierte Anzahl  $\omega$  Gruppen gewählt wurde. Sollte die Liste abgelaufen worden sein, ohne dass bereits die Zuordnungen für  $\omega$  Gruppen entfernt wurden, so wird die Liste erneut durchlaufen, um eine neue Startgruppe zu finden.

Die zweite  $H^-$  Heuristik ist die „Time-step destroy heuristic“. Bei dieser Heuristik wird zufällig ein Zeitpunkt ermittelt. Beginnend von diesem Zeitpunkt werden Fahrzeuggruppen entfernt, welche sich zu diesem Zeitpunkt auf dem Terminal befinden. Diese Heuristik wird ebenfalls durchgeführt, bis  $\omega$  Gruppen entfernt wurden. Sollten bei einem Zeitpunkt weniger Gruppen als  $\omega$  Gruppen entfernt worden sein, so wird ein neuer zufälliger Zeitpunkt ermittelt und die Heuristik wiederholt.

Bei der Dritten, der „Worst-out heuristic“, wird die Zuordnungsgüte adressiert. Hierfür wird für jede Fahrzeuggruppe die theoretisch beste Zuordnung mit minimaler Fahrstrecke ermittelt und die Differenz der Fahrstrecken für die aktuelle Zuordnung  $\Delta_{fk}$  bestimmt. Die Gruppen werden absteigend nach  $\Delta_{fk}$  sortiert. Nachdem eine Gruppe ausgewählt wurde, werden ähnlich wie bei der „Largest-out heuristic“ weiter Gruppen gewählt, welche zeitliche Aufenthaltsüberschneidungen mit der gewählten Gruppe haben. Sollten weniger Gruppen als  $\omega$  Gruppen entfernt worden sein, so wird ausgehend von der sortierten Liste eine neue Startgruppe gewählt.

Die letzte  $H^-$  ist die „Random removal heuristic“. Hierbei werden zufällig Fahrzeuggruppen ausgewählt, bis schließlich  $\omega$  Gruppen entfernt wurden. Sobald mindestens eine Gruppe gewählt wurde, gilt als einziges Kriterium für weitere ausgewählte Gruppen, dass sie mit mindestens einer der bisher ausgewählten Gruppe zeitliche Aufenthaltsüberschneidungen aufweisen.

Die „Largest-first heuristic“ ist eine der beiden  $H^+$  Heuristiken. Hierbei werden die Fahrzeuggruppen absteigend nach einem zu berechnenden Parameter sortiert. Das

---

Sortierkriterium ist das Produkt aus zu erwartender Standzeit der Gruppe auf dem Terminal und der Fahrzeuganzahl. Die sortierte Liste der zuzuordnenden Fahrzeuge wird sukzessive durchlaufen. Anhand eines Zufallsparameters  $p$  wird entschieden, ob die Gruppe in dem aktuellen Schritt zugewiesen werden soll. In diesem Fall wird die Gruppe den Reihen zugeordnet, bei denen zuerst gültige (überschneidungsfreie) Zuordnung möglich ist. Dieser Vorgang wird so oft wiederholt, bis alle durch die  $H^-$  Heuristik entfernten Gruppen wieder zu der Lösung zugeordnet wurden.

Die „Worst-first heuristic“ verwendet ebenfalls den Parameter  $\Delta_{fk}$ . Die zuzuordnenden Fahrzeuggruppen werden absteigend sortiert. Anschließend wird die Liste sukzessive durchlaufen und mittels eines Zufallsparameters  $p$  wird entschieden, ob die Gruppe der ersten gültigen Position oder der von allen Möglichkeiten bestmöglichen Position zugewiesen wird. Nachdem die Liste durchlaufen wurde, sind alle Fahrzeuggruppen zugewiesen.

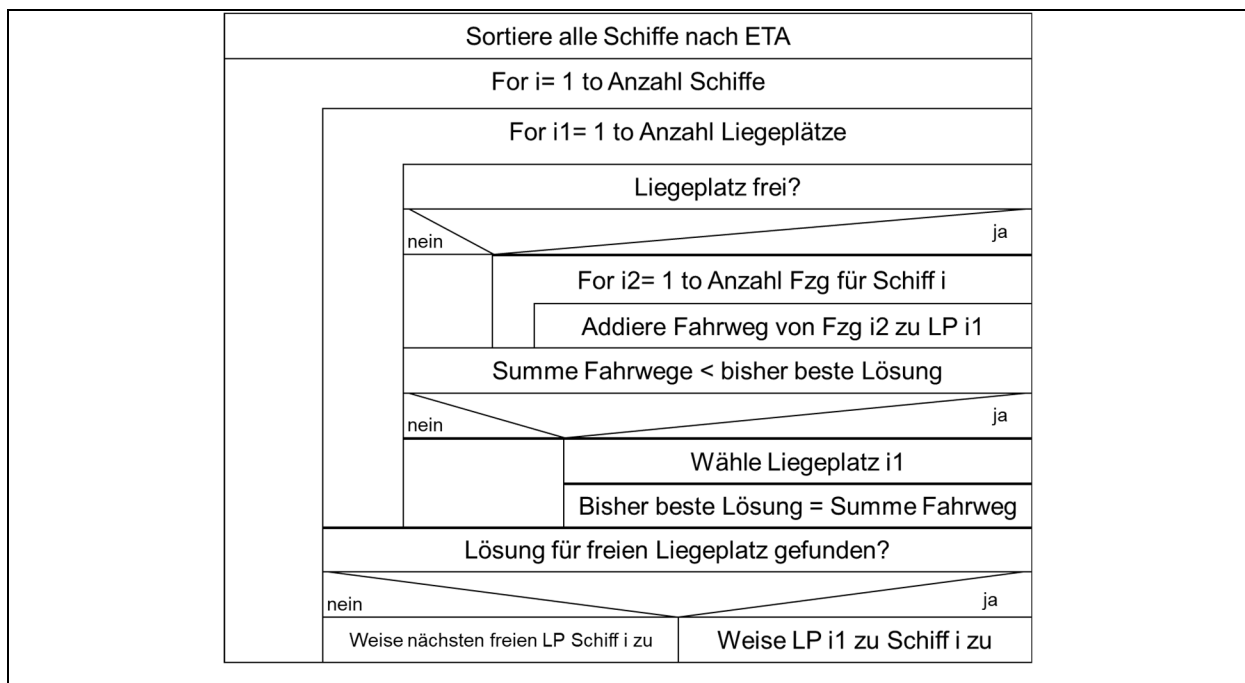
Die Auswahl einer  $H^-$  und  $H^+$  Heuristik erfolgt nach einem adaptiven Auswahlmechanismus. Bis eine erste gültige Lösung gefunden wurde, werden ausschließlich die „Largest-out heuristic“ und die „Largest-first heuristic“ verwendet. Erst nachdem eine zulässige Lösung gefunden wurde, beginnt die dynamische Auswahl. Hierfür wird die  $H^-$  anhand der Lösungsgüte der vorherigen Lösungen ausgewählt. Als  $H^+$  wird ausschließlich die „Worst-first heuristic“ verwendet.

Die Abbildung 45 zeigt einen weiteren Schritt – die Post-Optimierungsfunktion – welche genauer beschrieben werden muss: Sobald eine Lösung gefunden wurde, wird diese Methode angewendet. Hierbei wird für alle Fahrzeuge der Lösung geprüft, ob ggf. eine bessere gültige Zuordnung existiert. Hierfür wird die gesamte Lösung anhand der  $\Delta_{fk}$ -Werte sortiert. Die Liste wird für die Prüfung sukzessiv durchlaufen. Wird eine bessere Zuordnung gefunden, so wird die alte Zuordnung direkt aufgelöst und die neue verbesserte Zuordnung vorgenommen.

Die Nutzung des Flächenzuordnungsalgorithmus von Cordau et al. stellt die für die Evaluation geforderte Rahmenbedingung nach einer Einbettung der Vergleichsmethoden in einen kaskadierten Planungsprozess sicher. Durch die Nutzung rollierender Planungshorizonte generiert der Algorithmus für diese Zeitscheiben Planungsergebnisse, welche dann wiederum die Ausgangslage für kommenden Planungsperioden sind. Hierdurch entsteht auch die klassische beschriebene Abhängigkeit zu den Verkehrsträgerallokationsplanungen, welche die zeitlich vorangegangene Flächenallokationsplanung als Eingangsgröße nutzen muss.

## 6.1.2 Benchmarks für die Liegeplatzplanung

Für den Benchmark der Liegeplatzplanung werden zwei verschiedene Zuordnungsmethoden verwendet. Die allgemeine Modellformulierung (siehe 4.3.3) beschreibt eine diskrete Liegeplatzanordnung. Folglich ist eine Umsetzung eines diskreten Liegeplatzalgorithmus zu Vergleichszwecken zielführend. Insgesamt werden für den Vergleich zwei algorithmische Zuordnungen implementiert. Die erste Methode ist eine einfache Heuristik, welche Schiffe anhand einer typischen „greedy“ Zuweisung zu den Liegeplätzen zuordnet. In der Literatur wird eine solche einfache Zuweisung oftmals als simpler Vergleichsbenchmark verwendet (siehe (Buhrkal et al., 2011; Umang et al., 2013)). Die folgende Abbildung 46 zeigt diese Basisheuristik als Pseudocode. In der weiteren Evaluation wird diese Basisheuristik als „BV“ abgekürzt.



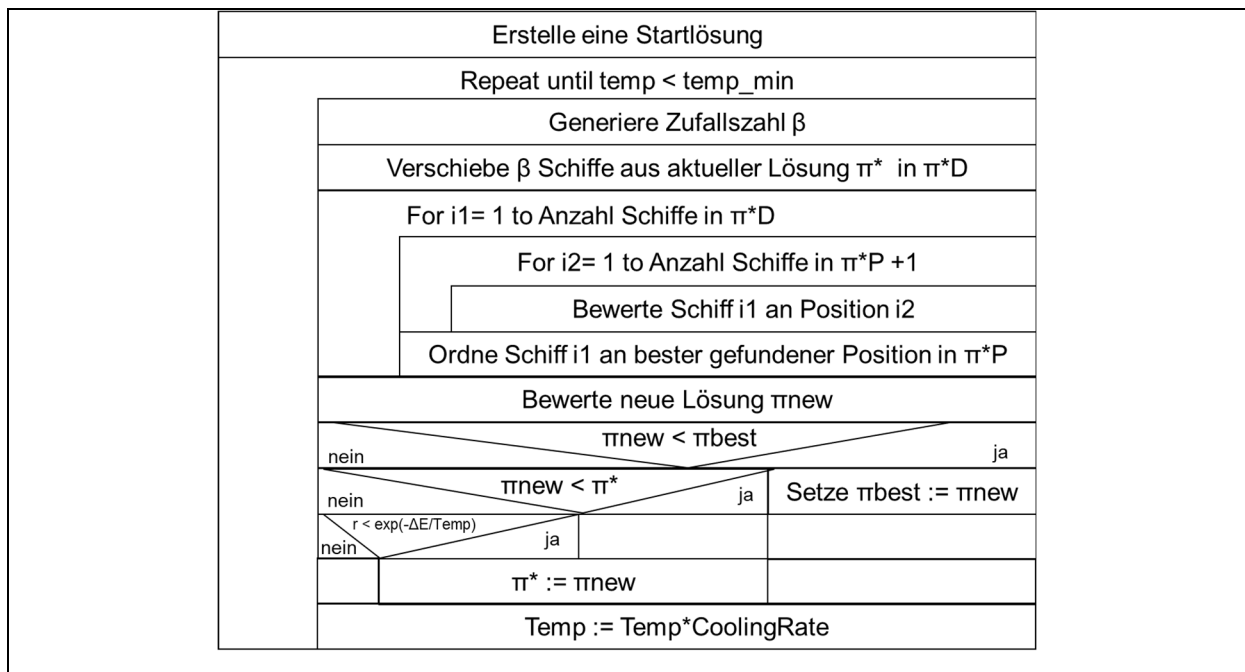
**Abbildung 46: Basisheuristik Liegeplatzzuweisung**

Dieser Basisalgorithmus wird später als einfacher Evaluationsbenchmark direkt verwendet. Zusätzlich zu dieser einfachen Basisheuristik wurde ein konventioneller metaheuristischer Ansatz nach Lin et al. (2014) implementiert, welcher wie der Flächenalgorithmus auf einem SA-Verfahren basiert und das Problem als „dynamic berth allocation problem“ (DBAP) löst (Lin et al., 2014). Aufgrund seiner breit anwendbaren Problemdefinition und der Möglichkeit, dynamische Schiffsankünfte zu berücksichtigen, ist der gewählte Algorithmus gut als Stellvertreter für die Evaluation geeignet. Der Algorithmus ordnet hierbei einen Satz von Schiffen mit definierten Ankunftszeiten iterativ den verfügbaren Kajan zu. Hierbei zielt er darauf ab, die Gesamtbedienzeit der Schiffe zu minimieren. Sie setzt sich aus der Bedienzeit eines



Schiffs an der jeweiligen Kaje und etwaigen Wartezeiten aufgrund vorangegangener Liegeplatzbelegungen zusammen (vgl. Abbildung 24).

Die konzeptionelle Möglichkeit eine initiale Kajenbelegung zu berücksichtigen, erlaubt es diesem Algorithmus ebenfalls für eine rollierende Planung eingesetzt zu werden. Für die Optimierung von folgenden Planungshorizonten können hierbei die Kajen für die entsprechende Dauer der vorherigen Belegung blockiert werden. Für ein besseres Verständnis der vorliegenden Umsetzung zeigt die folgende Abbildung 47 den umgesetzten Algorithmus als Pseudocode. Zunächst wird eine Initiallösung auf Grundlage des first come first served (FCFS) Prinzips gebildet. Die Liste der Schiffe wird nach ihrer Ankunftszeit (estimated time of arrival - ETA) geordnet. Anschließend wird jedem Schiff die Kaje mit der geringsten Bedienzeit zugewiesen. Die Bedienzeit je Kaje wird anhand der Fahrstecken, der für das jeweilige Schiff zugeordneten Fahrzeuge berechnet. Folglich weisen Kajen mit kurzen durchschnittlichen Fahrwegen eine kürzere Bedienzeit auf als Kajen, welche mit längeren Fahrwegen verbunden sind.



**Abbildung 47: Liegeplatzalgorithmus nach (Lin et al., 2014)**

Auf der Grundlage der Startlösung beginnt die eigentliche Berechnung. In einem Destruktionsschritt werden aus der aktuellen Lösung  $\pi^*$  eine zufällige Anzahl Schiffe ( $\beta$  - Zufallszahl in den Grenzen zwischen  $\beta_{min}$  und  $\beta$ ) in eine temporäre Zuordnung  $\pi^*_D$  verschoben. Die Schiffe des Sets  $\pi^*_D$  werden in der gleichen Reihenfolge wieder in die aktuelle Lösung  $\pi^*_P$ , welche um das Set  $\pi^*_D$  vermindert ist, eingefügt, bis die Lösung  $\pi^*_P$  wieder vollständig alle Schiffe umfasst. Diese neue Lösung wird mit  $\pi^*_{new}$  bezeichnet. Bei dieser Zuordnung

---

werden alle möglichen Einfügepositionen der Schiffe aus  $\pi^*_D$  in  $\pi^*_p$  ausprobiert. Das jeweilige Schiff wird in  $\pi^*_p$  eingefügt, welches zur geringsten Gesamtbedienzeit führt. Nachdem eine neue Lösung  $\pi^*_{new}$  zusammengesetzt wurde, wird die Lösung abschließend bewertet.

Ist die neue Lösung die beste Bekannte, so wird sie gespeichert und als neue Lösung akzeptiert. Ist die neue Lösung schlechter als die beste bekannte Lösung, aber besser als die aktuelle Lösung, so wird die neue Lösung als aktuelle Lösung gesetzt. Sollte die neue Lösung schlechter sein als die aktuelle Lösung, wird mit dem beschriebenen SA-Mechanismus entschieden, ob die Lösung akzeptiert wird. Hierbei hängt die Entscheidung von der Ergebnisdifferenz und der Temperaturvariablen ab. Durch das simulierte Abkühlen wird mit zunehmender Laufzeit die Wahrscheinlichkeit geringer, dass Verschlechterungen als neue Lösung akzeptiert werden. Dieser algorithmische Ansatz wird in der weiteren Evaluation als „AV“ abgekürzt bezeichnet.

Auch die hinsichtlich der Verkehrsträger angewendete rollierende Algorithmus erfüllt die unter Kapitel 5.5 Forderung nach der Rahmenbedingung des klassischen kaskadierten Planungsprozesses. Hierbei basieren die Ergebnisse der Verkehrsträgerallokationsentscheidungen auf den Ergebnissen der vorangegangenen Flächenplanung. Durch die Anwendung als rollierender Algorithmus determinieren die Verkehrsträgerplanung wiederum Aspekte der Flächenplanung für den nächsten Planungshorizont. Durch die Anwendung als rollierender Algorithmus und die damit verbundene temporale Untergliederung des Gesamtzeithorizonts deckt sie sich mit der Vorgehensweise in dem klassischen kaskadierten Planungsprozess.

### 6.1.3 Weitere Benchmarks und Zielgrößen in der Evaluation

Die Evaluation der Szenarien und der Leistungsfähigkeit der neuen Selbststeuerungsmethode wird anhand des unter 4.2 beschriebenen Zielsystems vorgenommen, indem einerseits die mittlere Fahrstrecke der bewegten Fahrzeuge und andererseits der flächenbezogene Sortiergrad für die Bewertung herangezogen wird. Die logistische Leistung des Selbststeuerungsansatzes wird in den verschiedenen Evaluationsstudien mit Benchmarkwerten verglichen, um die Leistungsfähigkeit abzuschätzen. Bezüglich der Flächenzuordnung ist die erste Vergleichsgröße eine zufallsbasierte Flächenzuordnung. In diesen Benchmarkszenarien werden Fahrzeuge nicht geplant, sondern anhand einer zufälligen Auswahl den Lagerreihen zugewiesen. Diese Art der Zuordnung wird offensichtlich zu sehr schlechten Ergebnissen hinsichtlich der Sortierung und der Fahrstrecken führen. Die Zufallszuordnung kann deshalb als obere Grenze der Evaluation angesehen werden. Anders verhält es sich bei der konventionellen Flächenzuweisung. Hierfür werden den Fahrzeuggruppen, ähnlich wie in dem realen Prozess, feste Lagerbereiche zugewiesen, in

denen die Fahrzeuge zu lagern sind. Diese Zuweisung wird, wie bei der Flächenmasterplanung, vor der Simulationsdurchführung anhand der erwarteten Volumina, den festen Anlieferpunkten und der verfügbaren Flächenkapazität vorgenommen. Diese Art der Zuweisung wird in dem generischen Szenario als konventionelle Zuweisung gesehen.

Sofern ein Szenario eine Verkehrsmittelzuweisung umfasst, wird eine algorithmische Zuweisung der Verkehrsmittel vorgenommen. Hierfür werden die in Kapitel 6.1.2 beschriebenen Benchmarkalgorithmen verwendet.

#### 6.1.4 Aufbau der Analyse mittels generischen Szenarios

Mittels des generischen Szenarios sollten die Hypothesen H1-H3 untersucht werden. Die hierfür durchzuführenden Analyseschritte zeigt die folgende Tabelle 6 im Detail.

**Tabelle 6: Untersuchungen an dem generischen Modell**

Szenario	Untersuchungsaspekt	Hypothese	Selbststeuerung		Zielgrößen	Kapitel
			Flächen	Verkehrsmittel		
Szenario 1	Dynamik	H1	Ja	Nein	Fahrwege Sortiergrad	6.1.5
Szenario 2	Komplexität	H2	Ja	Nein	Fahrwege Sortiergrad	6.1.6
Szenario 3	Methodenintegration und Evaporation	H3	Ja	Ja	Fahrwege Sortiergrad	6.1.7
Szenario 3	Gewichtungsfaktoren	H3	ja	Ja	Fahrwege Sortiergrad	6.1.8

In ihrer Grundausrichtung sind die verwendeten Szenarien (1-3) grundsätzlich sehr ähnlich und basieren auf dem unter 6.1 beschriebenen Basisszenario. Die Analyse der jeweiligen Fokusaspekte erfordert jedoch leichte Anpassungen an den Szenarien. So müssen beispielsweise weitere Hersteller und Flächen für die Untersuchung der strukturellen Komplexität zusätzlich eingeführt werden. Die Beschreibungen der genutzten Parameter und die Ausgestaltung der Szenariodetails wird in den jeweiligen Unterkapiteln vorgenommen.

#### 6.1.5 Leistungsfähigkeit im dynamischen Umfeld

In einem ersten Analyseschritt soll die Evaluationshypothese H1 überprüft werden. Wie bereits unter 2.1.2.1 und 2.1.2.2 diskutiert, kann der Begriff der Dynamik auf verschiedene Ausprägungen bezogen werden. Im Rahmen der Hypothese H1 ist ein dynamisches Umfeld als externe dynamische Systemkomplexität zu verstehen. Die neue selbststeuernde Flächenzuordnungsmethode soll gegenüber externer Dynamik zu stabilen und zielkonformen Systemverhalten bei zunehmend volatilen externen Rahmenbedingungen führen. Die

allgemeine Betrachtung von Autoterminalsystemen unter 2.5 zeigte, dass Terminals durch ihre Rolle als Entkopplungspunkt in der Supply Chain insbesondere durch die zeitliche Verteilung der Ein- und Ausgänge der Fahrzeuge bestimmt werden. Deswegen werden in der folgenden Analyse die Inputfunktion  $f_k^I(t)$  und das Abgangsverhalten der Fahrzeuge als Faktoren für die Erzeugung externer Dynamik variiert und in einem Szenario des generischen Terminalmodells mit 4x4 Lagerflächen analysiert. Die räumliche Ausprägung der Lagerflächen wurde folgendermaßen definiert: Breite der Lagerfläche  $w = 160m$ , Höhe  $h = 75m$  und der Reihenabstand wurde auf  $r = 3m$  gesetzt. Bei einer angenommenen Standardlänge von 5 m je Fahrzeug besitzt dieses Szenario eine Kapazität von 12.720 Fahrzeugen. Um die Analyse möglichst einfach zu halten, umfasst dieses Szenario zwei OEMs, welche zu zwei Destinationen verschifft werden sollen. Die Tabelle 7 gibt eine Übersicht über den HMD-Mix in dem Szenario.

**Tabelle 7: HMD-Mix der OEM in Szenario 1**

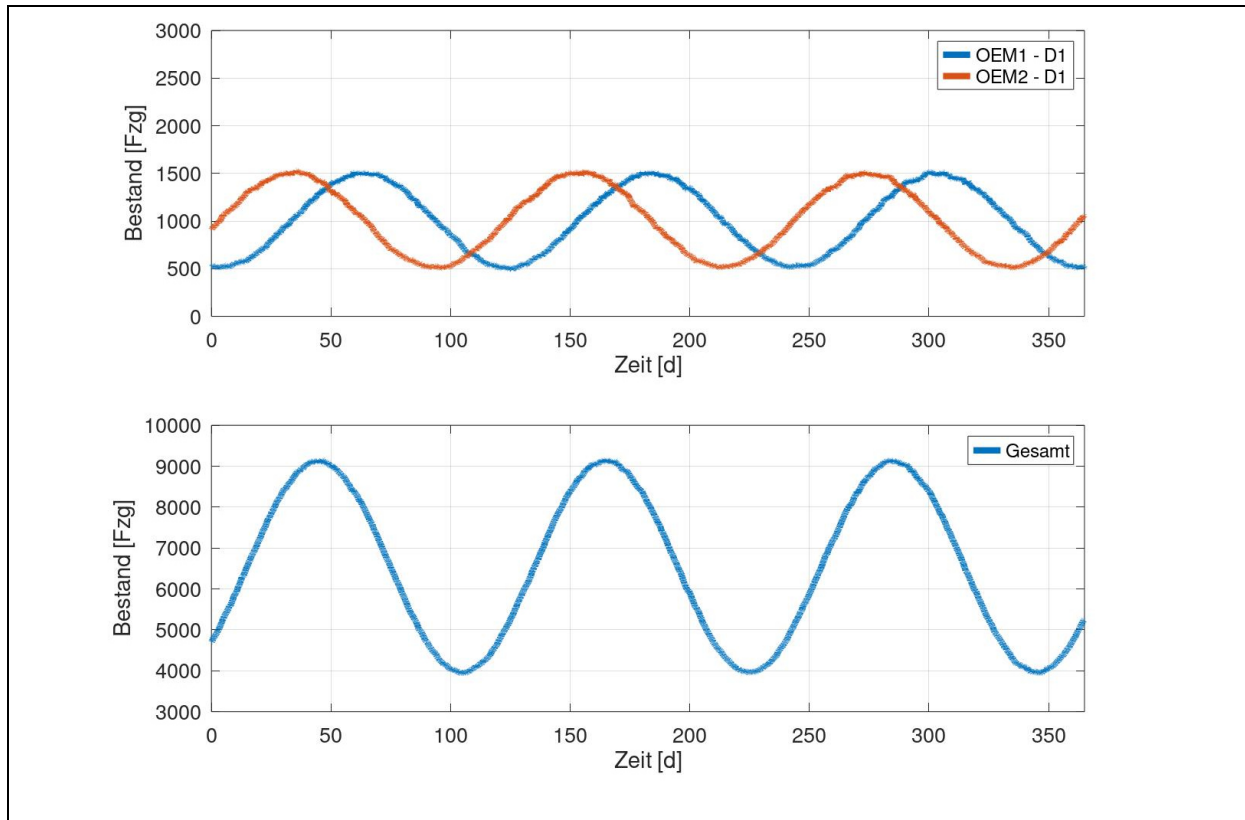
OEM	Modell	Destination	Mittleres Ankunftsvolumen $\lambda$ [Fzg/d]	Phasenversatz $\varphi$	Anfangsbestand [Fzg]
OEM 1	M1	D1	100	0%	1000
OEM 1	M2	D2	75	25%	1000
OEM 2	M3	D1	100	50%	1000
OEM 2	M4	D2	75	75%	1000

Wie in Gleichung (10) beschrieben, wird eine sinusförmige Einlastungsfunktion genutzt. Hierbei werden für die einzelnen HMD-Mix-Positionen ein konstantes mittleres Ankunftsvolumen und ein konstanter Phasenversatz definiert (siehe Tabelle 7). Der Phasenversatz ist auf die Simulationsdauer von 365 Tagen bezogen. Die Periodenlänge  $T$  wurde auf ein viertel Jahr gesetzt. Um Situationen verschiedener Dynamik abbilden zu können, wird in verschiedenen Simulationsläufen die Amplitude  $\mu^k$  der Ankunftsfunction variiert. Die folgende Abbildung 48 zeigt die Ankunftsfunctionen beispielhaft für zwei HMD-Kombinationen (oben) und die resultierende Gesamtfunktion (unten). Die Abgänge in dem Szenario wurden in zwei Modi modelliert. Im ersten Modus werden lineare Abgänge angenommen. Hierbei werden die durchschnittlichen Verweildauern fest definiert und den Fahrzeugen mittels einer Normalverteilung zufällig zugeordnet. Die folgende Tabelle 8 fasst die Verweildauern je OEM-Modell zusammen.

**Tabelle 8: Durchschnittliche Lagerdauer**

	OEM-M1	OEM-M2	OEM-M3	OEM-M4
Mittlere Lagerdauer [d]	10	20	10	20
Varianz [d]	2	2	2	2

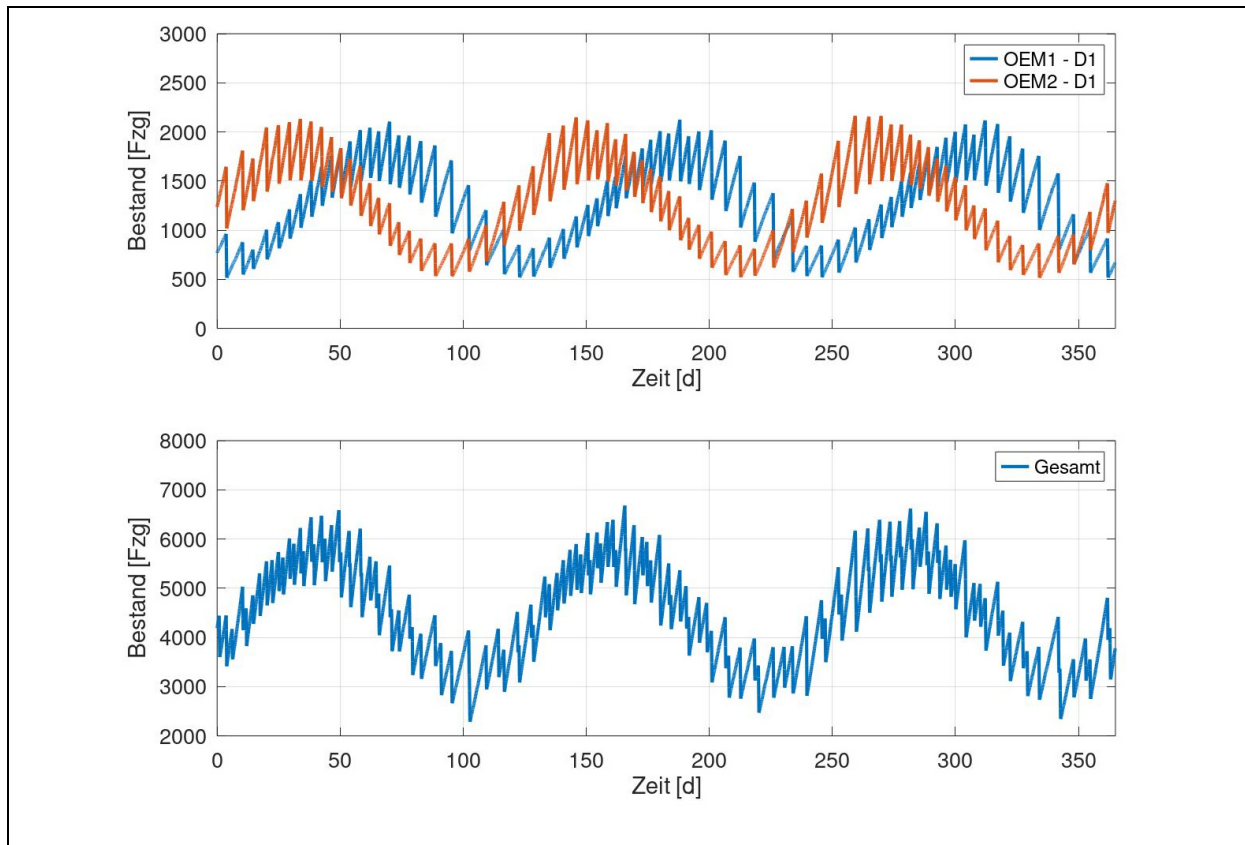
Der zweite Modus bildet das Ausgangsverhalten des Terminals realistischer ab, indem Schiffe mit einem normalverteilten Ladungsvolumen modelliert werden. Aus der Ankunft von Schiffen resultiert, anders als im ersten Modus, ein punktuell geballter Abtransport von Fahrzeugen. Dies kann als zusätzliche Quelle für externe Dynamik verstanden werden, welche auch auf realen Autoterminals zu finden ist.



**Abbildung 48: Beispielhafte Fahrzeugankunftsfunktion in Szenario 1**

Die mittlere Ladekapazität der Schiffe wird in den verschiedenen Simulationsläufen im Wertebereich zwischen 500 und 2.000 Fahrzeugen variiert und die Standardabweichung der hinterlegten Normalverteilung wurde mit 10 % des jeweiligen Mittelwerts modelliert. Abbildung 49 zeigt exemplarisch den erwarteten Bestandsverlauf für zwei HMD-Kombinationen und den Gesamtbestand (oben: 600 Fzg. differenziert nach Destinationen; unten: 2000 Fzg. nur Gesamtbestand).

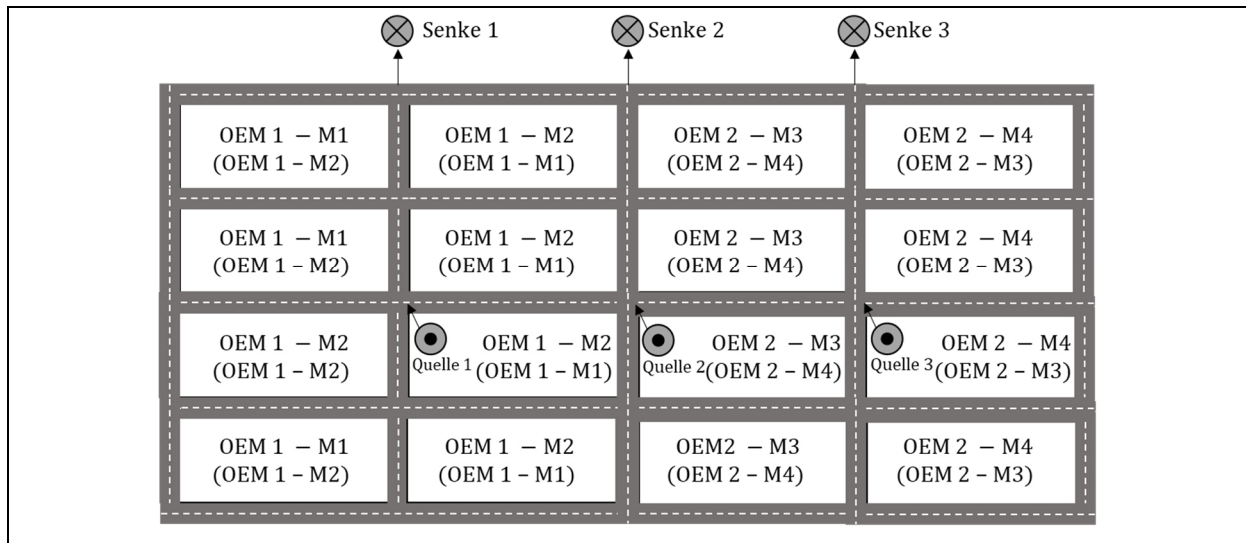
Durch die sinusförmige Eingangsfunktion und die konstanten mittleren Tagesvolumen (siehe auch Tabelle 7) umfasst ein Simulationslauf des Szenarios (Simulationsdauer: 365 Tage) ca. 127.000 Fahrzeuge. Hierbei verändert die Variation der Amplitude und der Schiffskapazität zwar die zeitliche Verteilung der Ein- und Ausgänge, nicht aber das jährliche Gesamtvolumen.



**Abbildung 49: Bestand über Zeit – Ladevolumen: 600 Fzg. (oben); 2000 Fzg. (unten)**

Als Benchmarkverfahren wurden drei verschiedene Ansätze verwendet. Die Analyse umfasst: eine konventionelle forecastbasierte Flächenzuordnung, eine algorithmische Flächenzuordnung und eine zufällige Zuordnung. Bei der konventionellen forecastbasierten Zuordnung wurden anhand der bekannten Eingangs- und Ausgangscharakteristika die Lagerbereiche in der Abbildung 50 für die OEMs festgelegt. Die Lager wurden so gewählt, dass möglichst große Volumenströme eine möglichst kurze Fahrdistanz zwischen Quelle und Senke haben. Neben den primären Flächenzuweisungen wurden alternativ zulässige Zuordnungen vorgenommen, welche in Situationen temporärer Kapazitätsüberlastungen genutzt werden können. Sie dienen der Abfederung von Volumenspitzen, welche durch die Variation der Amplitude und des Schiffsladevolumens entstehen können. Die Abbildung 50 zeigt detailliert die strukturellen Gegebenheiten des Szenarios und die Flächenzuordnung. Die Fahrzeuge werden in drei Quellen angeliefert. Hierbei verteilen sich Herstellervolumen folgendermaßen: an Quelle 1 werden 75 % des Volumens von OEM1 angeliefert. Die Quelle 2 liefert jeweils 25 % des Volumens von OEM1 und OEM2, während 75 % des Volumens von OEM2 an Quelle 3 ankommen. In ähnlicher Weise sind die Orte für die Fahrzeugabgänge modelliert. Fahrzeuge (oder Schiffe) mit der Destination 1 verlassen zu 75 % das Terminal über Senke 1, 20 % über Senke 2 und 5 % über Senke 3. Für die Destination 2 verlassen 75 % das Terminal über Senke 3, 20 % über Senke 2 und 5 % über Senke 1.

Um einen fairen Vergleich sicherzustellen, stehen auch für die pheromonbasierte Methode nur die jeweils OEM-bezogenen Flächen zur Verfügung. Eine Zuweisung von OEM1 Fahrzeugen zu Flächen von OEM2 ist nicht gestattet.



**Abbildung 50: Flächenzuordnung**

Für den zweiten algorithmischen Benchmark wurde der unter 6.1.1 beschriebene rollierende Algorithmus von Cordeau et al. angewendet. Aufgrund der Szenariogröße ist eine Lösung auf Basis einer Einzelinstanz, bedingt durch die benötigte Rechenzeit, nicht möglich. Zudem würde dies bedeuten, dass alle Aufträge für den gesamten Planungszeitraum (1 Jahr in dem betrachteten Szenario) vollständig im Vorfeld bekannt sind. Diese Annahme wäre nicht realistisch. Daher wurde für die algorithmische Lösung des Szenarios die Variante mit rollierenden Planungszeiträumen genutzt. Hierbei wurde ein Planungszeitraum von drei Tagen angenommen. Die Zeitscheibe, nach denen die Fahrzeuggruppen für den Algorithmus bestimmt werden, wurde auf 24 Stunden gesetzt. Diese Zeitscheibe scheint sinnvoll vertretbar, da in diesem Szenario die Eingangs- und Ausgangeinlastung ebenfalls auf Ebene von vollen Tagen (24h) bestimmt wurde. Alle relevanten Parameter des Algorithmus werden in der folgenden Tabelle 9 zusammengefasst:

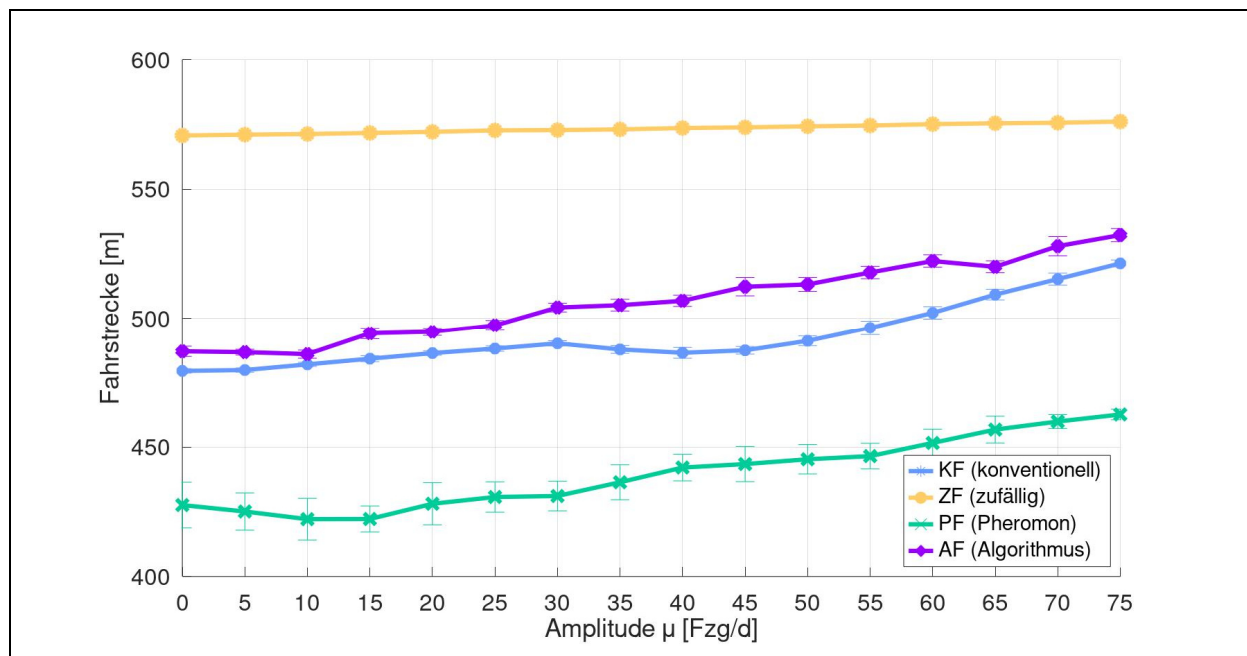
**Tabelle 9: Parameter des Flächen-Algorithmus (AF)**

Parameter	Ausprägung
Planungszeitraum	3 Tage
Zeitschritte (time steps)	24h
Start-Temperatur	5000
End-Temperatur	1000
Cooling Rate	0,95
Gruppierungseigenschaften	Hersteller-Modell-Destination (HMD-Mix)
Modifikationswahrscheinlichkeit	40 %
$\omega$ (Untergrenze)	20 %
$\omega$ (Obergrenze)	80 %

Den dritten Benchmark stellt eine Zufallszuordnung, wie unter 6.1.3 beschrieben, dar. Fahrzeuge werden hierbei zum Zeitpunkt ihres Eingangs zufällig einer beliebigen Reihe, deren Kapazität noch nicht erschöpft ist, zugewiesen.

Die Abbildung 51 zeigt die Simulationsergebnisse für verschiedene  $\mu^k$  Werte für die pheromonbasierte Methode zur Flächenzuordnung (PF), die konventionelle Flächenzuordnung (KF), die konventionelle algorithmische Flächenzuordnung (AF) und die zufallsbasierte Flächenzuordnung (ZF). Für die Läufe der PF Methode wurden die Gewichtungsfaktoren folgendermaßen für alle Simulationsläufe gesetzt:  $\gamma_{1-3} = 0,1$  und  $\gamma_4 = 0,4$ . Die Evaporationskonstante beträgt in allen Läufen  $\alpha = 800$ . Für jeden Simulationslauf eines Einlastungsparameters wurden 10 zufallsbasierte Replikationen der jeweiligen Parametrisierung erstellt und einzeln über den Betrachtungszeitraum von 365 Tagen simuliert.

Die Abbildung 51 zeigt die durchschnittlichen Fahrstrecken über alle Replikationssimulationsläufe für alle Methoden. Die Fehlerindikatoren der Abbildung 51 zeigen die zugehörige Standardabweichung der Replikationssimulationsläufe. Hierbei bestätigt die Abbildung die Vermutung, dass die ZF Methode zu den schlechtesten Ergebnissen führt. Auch mit steigender Dynamik durch die zunehmende Amplitude kann bei der ZF keine signifikante Veränderung der realisierten Fahrstrecken erkannt werden.



**Abbildung 51: Simulationsergebnisse bei linearem Abgangsverhalten**

Anders verhalten sich die übrigen Methoden. Die Fahrstrecken bei der KF Methode zeigt bis zu einer Amplitude von 40 Fzg/pro Tag einen sehr moderaten Anstieg. Dies verändert sich allerdings bei einer Amplitude von 45 Fzg/pro Tag. Ab diesem Wert scheint die Fahrstrecke



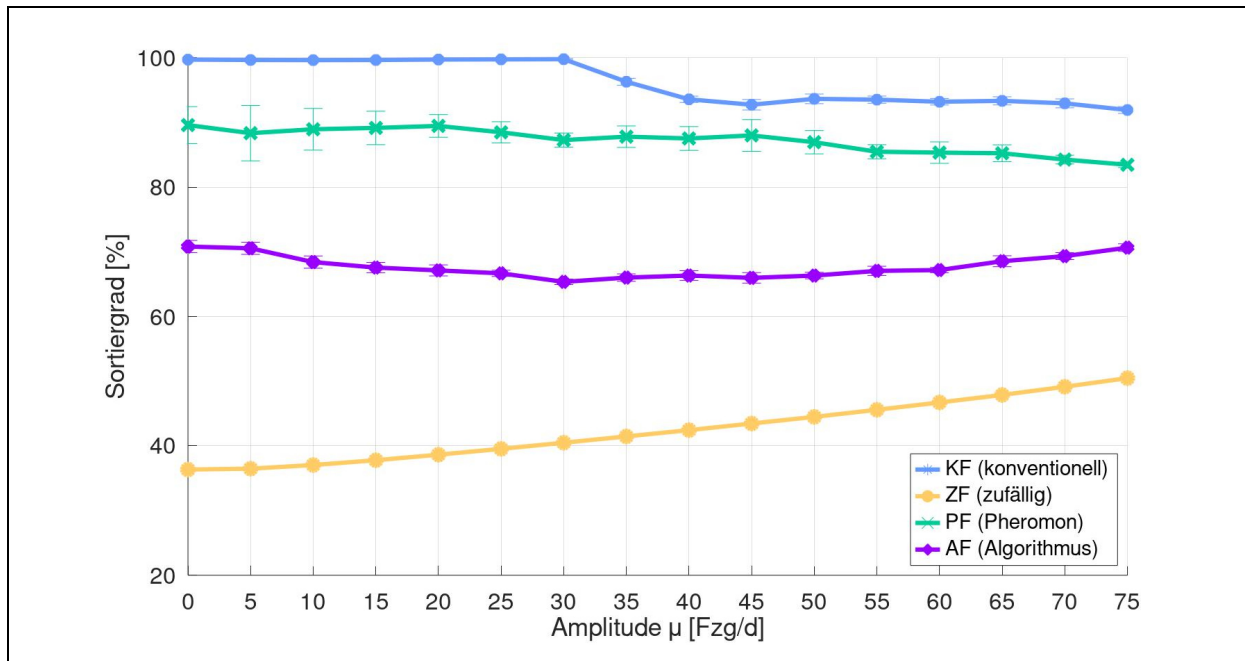
---

linear mit der Amplitude zu steigen. Dieses Umschaltverhalten kann durch die Kapazität der Flächen und die sekundäre Flächenzuordnung erklärt werden.

Ab diesem Punkt überschreiten die Volumenpeakwerte die Flächenkapazitäten für die primäre Zuordnung und Ausweichflächen werden genutzt. Hierdurch werden zunehmend längere Fahrwege generiert. Die konventionelle algorithmische Zuweisung AF-Methode verhält sich sehr ähnlich wie die KF. Die Fahrstrecken bei der AF-Methode steigen mit zunehmender Amplitude. Interessanterweise führt die algorithmische Zuordnung zu leicht schlechteren Ergebnissen als die KF. Die Differenz zwischen beiden Methoden steigt mit zunehmender Dynamik. Hieraus kann geschlossen werden, dass die algorithmische Zuordnung besonders in weniger dynamischen Situationen zu besseren Ergebnissen führt. Bis zu einer Amplitude von 25 Fahrzeugen pro Tag führen beide Methoden zu nahezu identischen Werten. Im Gegensatz zu den konventionellen Methoden (KF und AF) führt die PF Methode zu einem anderen Verhalten. Sie führt in allen Läufen zu deutlich geringeren Fahrstrecken als die konventionellen Methoden. Durch selbststeuernde Zuordnungsentscheidung kann die Methode die Fahrzeuge effizienter in den Reihen verteilen. Dieser Effekt scheint bei zunehmender Dynamik erhalten zu bleiben. Ein Umschalten, wie bei der KF, kann für die PF nicht erkannt werden. Die Abbildung zeigt, dass mit zunehmender Dynamik die Fahrstrecken bei der PF nahezu linear steigen. Dennoch bleiben die beobachteten durchschnittlichen Fahrstrecken deutlich unter denen der anderen Methoden. Diese grundsätzliche Tendenz für einen Anstieg ist aufgrund der punktuellen Volumenüberlastungen durch die steigende Amplitude zu erwarten. Die Beobachtungen zeigen in diesem Zusammenhang, dass die PF Methode in der Lage ist wachsende externe Dynamik zu handhaben.

Die Abbildung 52 zeigt ergänzend die beobachteten durchschnittlichen Sortiergrade auf Blockebene (vgl. Abbildung 50) für alle Methoden. Erwartungsgemäß werden die besten Sortiergrade bei der KF beobachtet. Durch die feste Zuordnung von Fahrzeugen zu Bereichen kann bei dieser Methode eine Verletzung der Sortierung lediglich in temporären Überlastungssituationen entstehen. Deutlich zu erkennen ist, dass bei geringer Dynamik sehr hohe Sortiergrade erreicht werden. Erst ab einer Amplitude von 35 Fzg/Tag fällt der Sortiergrad. Im Vergleich zu den anderen Methoden bleibt er dennoch auf dem höchsten Niveau. Auch die PF zeigt hohe Sortiergrade (87,2 % im Durchschnitt). Insgesamt bleibt der Sortiergrad bei dieser Methode auf einem konstanten Niveau. Deutlich geringere Sortiergrade werden bei der algorithmischen Zuordnung realisiert (67,7 % im Durchschnitt). Dies ist durch die konzeptionelle Gestaltung des Algorithmus zu erklären. Der Algorithmus versucht Fahrzeuggruppen in zusammenhängenden Reihen unabhängig von der Blockpositionierung zu planen. Hier liegt der Fokus vornehmlich auf der Realisierung einer reihenreinen Lageraufstellung. Da somit der Blocksortiergrad nicht mit der algorithmischen Zielfunktion

abgebildet wird, führt diese mangelnde Berücksichtigung zu geringeren Ausprägungen dieser Zielgröße. Dies wird bei einer Betrachtung des Reihensortiergrads deutlich. Für die AF-Methode liegt der Reihensortiergrad im Durchschnitt bei 99,5 %. Im Vergleich hierzu liegt er bei 99,7 % bei der KF-Methode und bei 91,5 % bei der PF.

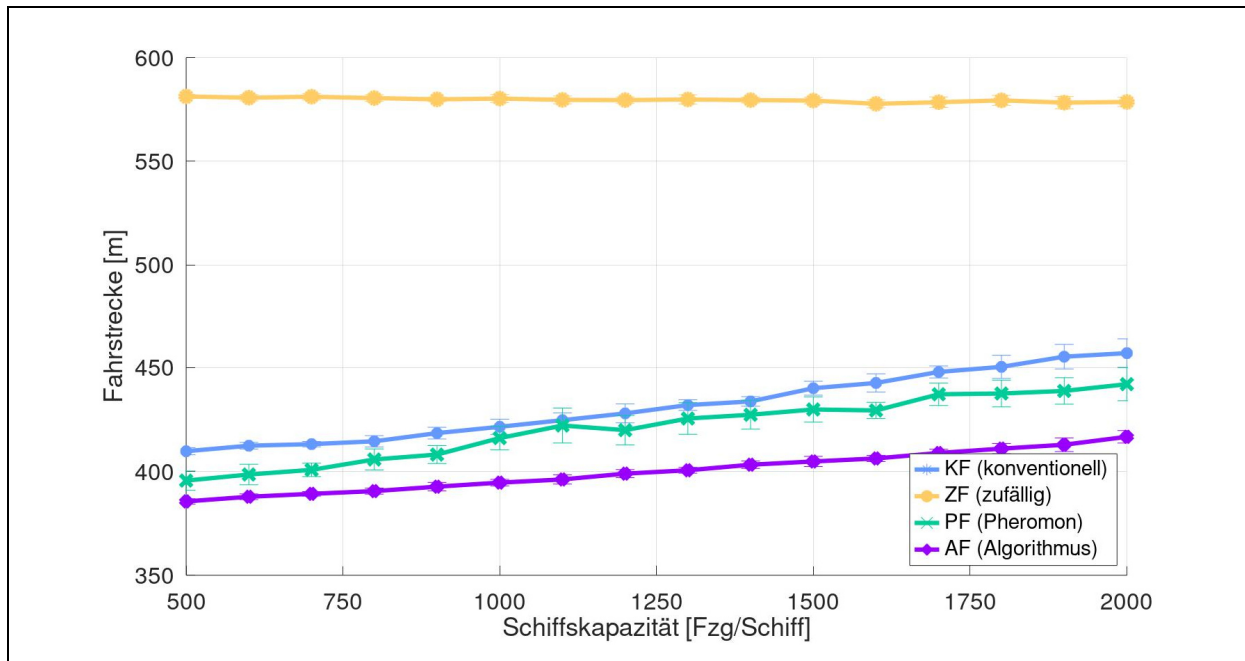


**Abbildung 52: Sortiergrade bei steigender Amplitude**

Zum Vergleich zeigt Abbildung 52 auch die Sortiergrade der zufälligen Zuordnung. Erwartungsgemäß liegt der Sortiergrad deutlich unter dem der anderen Methoden. Interessanterweise steigt er allerdings mit zunehmender Amplitude. Dies ist durch die temporären Überlast- und Unterlastsituationen zu erklären. In den Unterlastsituationen ist der Gesamtbestand und der Bestand in den Blöcken gering. Durch die geringe Auslastung ist eine rechnerische Verschiebung des Verhältnisses der zugeordneten Fahrzeuge einer Gruppe zum Bestand eines Lagerblocks wahrscheinlicher. Durch die steigende Amplitude dauern die Unterlastphasen länger an und dieser rechnerische Effekt wird nominell größer.

Die folgende Abbildung 53 zeigt die durchschnittlichen Fahrstecken aller Methoden für den zweiten Modus, mit fester Amplitude und variierender Schiffskapazität. Alle Läufe der Abbildung 53 wurden mit einer festen Amplitude von 50 Fzg/pro Tag durchgeführt. Erwartungsgemäß fungiert auch bei dieser Betrachtung die ZF als oberer Grenzwert. Die Zufallszuweisungen sind durchgängig ineffizient und weisen keine Abhängigkeit zum Ladevolumen der Schiffe auf. Wie auch in der ersten Analyse führt die PF in allen Läufen zu den besseren Ergebnissen als die KF. Allerdings beträgt der Unterschied lediglich zwischen 3,5 % (bei 500 Fahrzeugen) und 3,7% (bei 2000) Fahrzeugen. Interessanterweise führt die

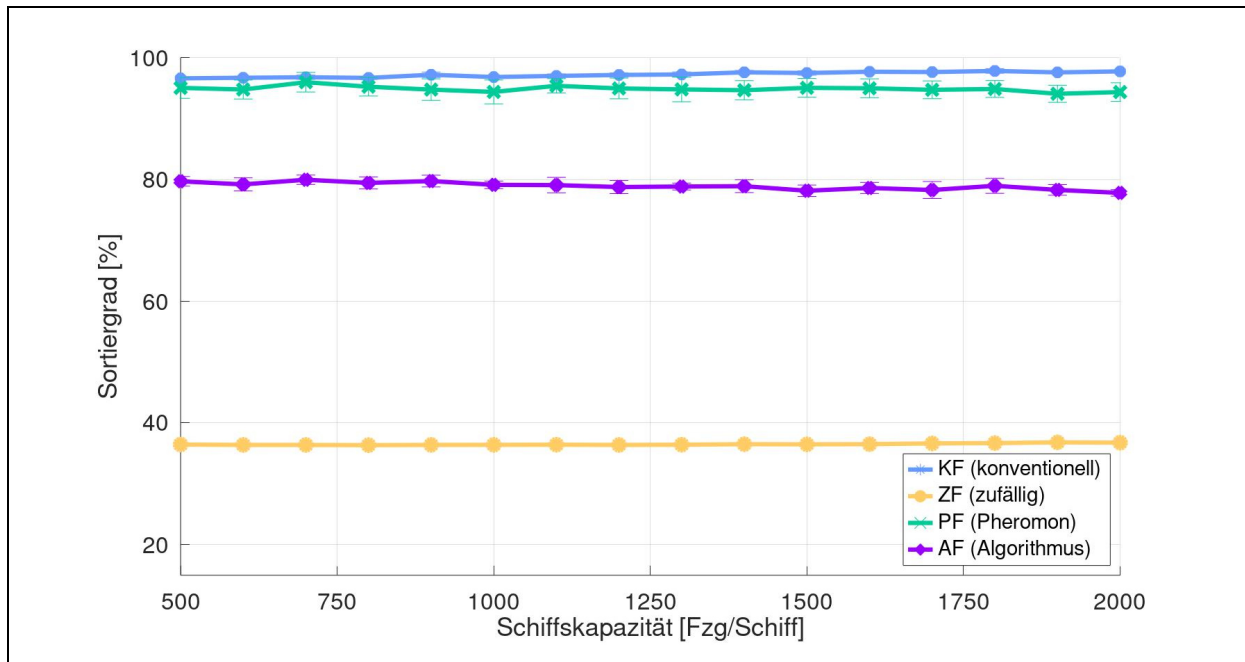
algorithmische Zuordnung in diesem Szenario zu den besten Ergebnissen (im Schnitt 7,2% im Vergleich zu KF und 4,9 % im Vergleich zu PF). Wie auch bei den anderen beiden Methoden weist die AF einen nahezu linearen Anstieg mit der zusätzlichen Schiffskapazität auf.



**Abbildung 53: Simulationsergebnisse bei Schiffsabgängen**

Dieses Ergebnis kann durch sich einstellende Bestandssituation in dem Szenario erklärt werden. Insgesamt weist dieses Szenario mit steigender Schiffskapazität längere Phasen mit sehr geringer Auslastung auf. Hierdurch entstehen, nicht wie bei dem Szenario mit linearem Abgang, starke temporäre Überlastungssituationen. Hier kann besonders die algorithmische Zuordnung ihre bereits unter 6.1.1 beobachtete Stärke in Situationen mit geringer Belegung nutzen. Da die Schiffe in diesem Szenario immer an den geplanten Liegeplätzen liegen, verfügt die algorithmische Zuordnung zudem über vollständige Planungsdaten, welche keine Unsicherheiten beinhalten. Durch die Kombination von Datenqualität und die geringe Terminalauslastung kann der Algorithmus scheinbar sehr effiziente Zuordnungen finden. Bei der Betrachtung der Abbildung 53 wird trotz der Dominanz der algorithmischen Zuordnung deutlich, dass die Unterschiede zur pheromonbasierten Methode gering sind. Im Durchschnitt liegt die pheromonbasierte Methode 4,9 % über der algorithmischen Zuordnung.

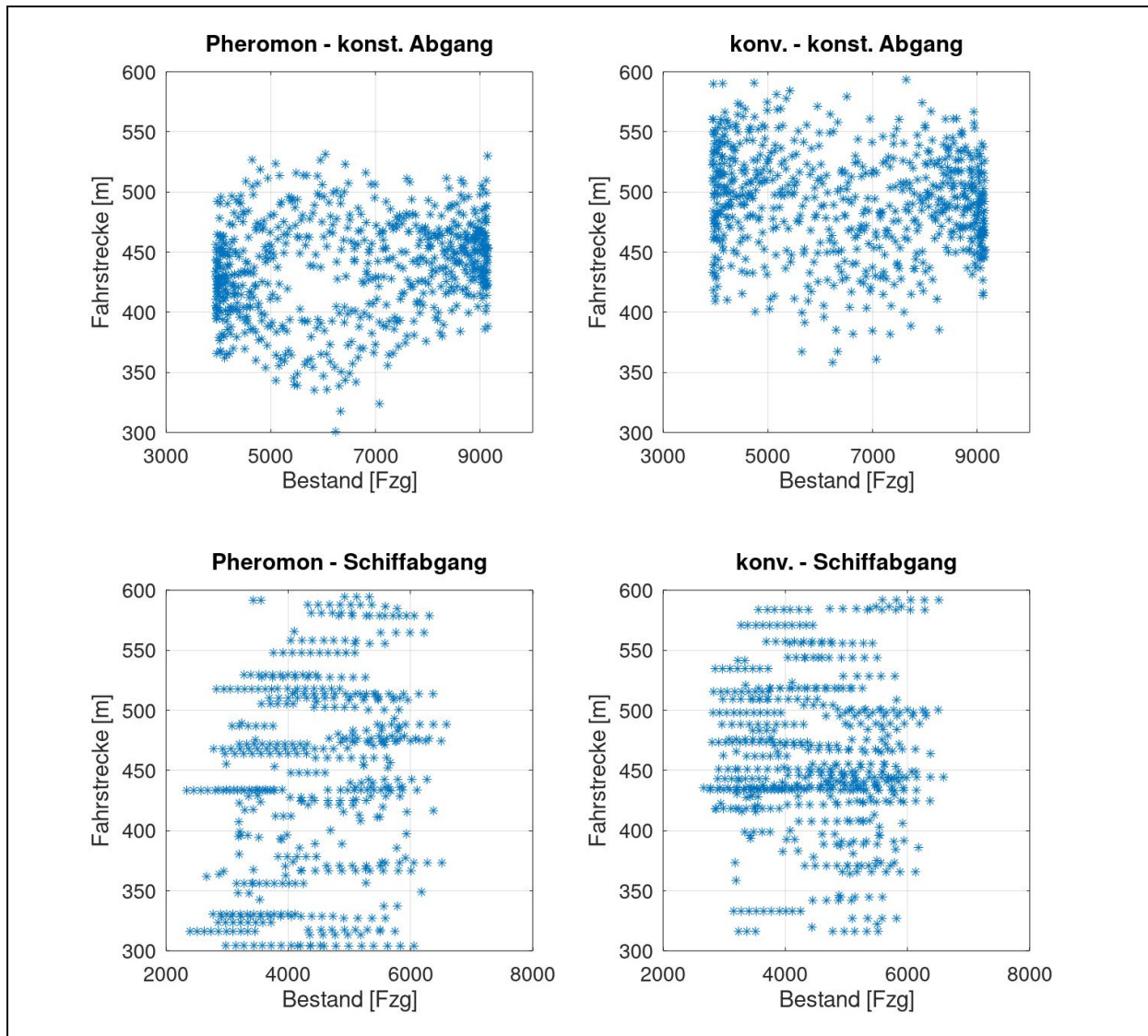
Die Abbildung 54 vervollständigt die Analyse. Sie zeigt die realisierten Sortiergrade für alle Methoden. Deutlich zu erkennen ist, dass auch in diesem Modus die KF Methode zur besten blockweisen Sortierung führt. Auch die PF Methode ist, wie schon in der Abbildung 52 erkannt wurde, auf einem vergleichbaren Niveau. Die AF Methode führt zu erkennbar schlechteren Ergebnissen. Dennoch ist der durchschnittliche Sortiergrad der AF Methode höher als bei der Abbildung 52.



**Abbildung 54: Sortiergrade bei Schiffsabgängen**

Bei weiterer Betrachtung von Abbildung 54 ist zu erkennen, dass die veränderten durchschnittlichen Schiffskapazitäten keinen nennenswerten Einfluss auf die Sortiergrade haben. Die Sortiergrade verlaufen für alle Methoden auf einem konstanten Niveau.

Im Vergleich der beiden unterschiedlichen Dynamiken (Amplitude und Ladevolumen) scheint der Einfluss der Eingangsamplitude stärker zu sein. Die Ergebnisse legen nahe, dass beide externe Faktoren in Kombination mit den Methoden zu unterschiedlichen internen Dynamiken führen. Dies wird durch die Abbildung 55 bestätigt. Sie zeigt exemplarisch das Systemverhalten in einzelnen unterschiedlichen Simulationsläufen als XY-Plot von beobachteten Bestandswerten und den jeweils beobachteten Fahrstrecken. Die oberen Grafiken beziehen sich auf die lineare Abgangssituation, während die unteren Diagramme die Ergebnisse für Läufe mit Schiffsabgängen bei einer Kapazität von 1000 Fahrzeugen zeigen. In allen Fällen beträgt die Amplitude 50 Fzg./pro Tag. Die dargestellten Punkte wurden in äquidistanten Zeitabständen während eines Simulationslaufs aufgenommen. Die Abbildung zeigt, dass die KF bei den linearen Abgängen grundsätzlich zu längeren Fahrstrecken führt. Interessanterweise werden hier insbesondere in Situationen nahe am Maximal- und Minimalbestand auch die höchsten Fahrstrecken realisiert. Die Selbststeuerungsmethode zeigt ein anderes Verhalten. Sie generiert auch in Situationen von hohen und niedrigen Beständen eine gleichmäßigere Verteilung der Fahrstrecken. Die Abbildung zeigt ein nahezu zyklisches Muster für die PF. Dies kann durch die linearen Fahrzeugabgänge erklärt werden.



**Abbildung 55: XY-Diagramme – Fahrstrecken über Bestand**

Durch die lineare zeitliche Kopplung von Ein- und Ausgang folgt der Bestand dem periodischen Verlauf der Eingangsfunktion. Nach einer hohen Belastung durch die Volumenpeaks werden mit einer Verzögerung Lagerflächen sukzessive langsam leerer. Während der temporären stärkeren Belastung werden zwangsläufig weiter entfernte Lagerorte angesteuert. Als Folge steigen die Fahrstrecken an. Umgekehrt verhält es sich beim Erreichen der Minimalbestände. Die Einführung von Schiffsankünften verändert diese Dynamik. Die Abbildung zeigt deutlich, dass die Punkte in der Fläche verteilt sind.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass die Ergebnisse dieser Szenarioanalyse zeigen, dass die erste Evaluationshypothese H1 tendenziell bestätigt werden kann. Durch die neue Selbststeuerungsmethode können unterschiedliche Formen externer Dynamiken besser im Sinne der gewählten Zielgröße bewältigt werden als durch eine konventionelle Flächenzuordnung.

---

### 6.1.6 Leistungsfähigkeit bei zunehmender struktureller Komplexität

Um die Wirksamkeit der neuen Selbststeuerungsmethode im Kontext steigender Komplexität untersuchen zu können, fokussiert die folgende Analyse auf die strukturelle Systemkomplexität. Hierfür wird in verschiedenen Simulationsläufen die Struktur des generischen Terminals systematisch variiert. Das skalierbare Szenario basiert auf den unter 6.1.5 beschriebenen Rahmenbedingungen. Die einzelnen Lagerflächen sind gleichermaßen konfiguriert ( $w = 160m$ ,  $h = 75m$  und  $r = 3m$ ). Um den Einfluss verschiedener Grade von struktureller Komplexität untersuchen zu können, wird die Anzahl verfügbarer Flächen  $A_{nm}$  schrittweise vergrößert. Konkret werden Konfigurationen mit 3x3, 4x4, 5x5, 6x6, 7x7, 8x8 und 9x9 Lagerflächen untersucht. Um die Analyse möglichst leicht verständlich zu gestalten, wird jeweils für die parallel angeordneten Lagerflächen ein OEM modelliert. Folglich existieren 3 OEMs in der 3x3 Konfiguration, 4 OEMs in der 4x4 Konfiguration und so weiter. Jeder OEM bedient genauso viele Destinationen, wie entsprechend sequenzielle Lagerflächen verfügbar sind (z.B. 3 Destinationen bei der 3x3 Konfiguration). Folglich existieren je nach Konfiguration  $k = m$  verschiedene HMD-Kombinationen.

In diesem Szenario wird ebenfalls eine sinusförmige Einlastungsfunktion (siehe Gleichung (10)) verwendet. Durch die Größenskalierung sind entsprechende Anpassungen der Einlastungsfunktionen vorzunehmen, damit alle Konfigurationen ein vergleichbares Verhältnis von Lagerkapazität und durchschnittlichem Fahrzeugbestand aufweisen. Mit zunehmender Anzahl Flächen wird die mittlere Ankunftsrate entsprechend erhöht. Die folgende Tabelle 10 zeigt die verwendeten durchschnittlichen Ankunftsraten für die einzelnen Konfigurationen.

Analog zu realen Terminals wurden variierende Standzeiten  $D^k$  modelliert. Die Standzeiten für sogenannte „high-runner“ Destinationen (hochfrequentierte Destinationen, die von den Reedern häufig angelaufen werden) sind kürzer als für „low-runner“. Die Tabelle 10 weist die entsprechenden Standzeiten für einen OEM aus. Die Phasenverschiebung der jeweiligen Sinusfunktionen wurde ebenfalls linear für die Fahrzeuggruppen eines OEM modelliert. Sie beträgt  $1/k$  für die jeweilige Konfiguration. Für die Simulationen wurde in allen Konfigurationen die Amplitude  $\mu^k$  in Höhe von 95% der jeweiligen  $\mu^k$  modelliert. Die Tabelle 10 zeigt exemplarisch die Einlastungswerte für OEM1. Die übrigen OEMs wurden analog modelliert. Allerdings wurden Einlastungswerte hierbei systematisch versetzt, sodass für alle Hersteller und alle Destinationen eine symmetrische Konfiguration vorliegt.

**Tabelle 10: Mittlere Ankunftsvolumen und Lagerdauer für einen OEM**

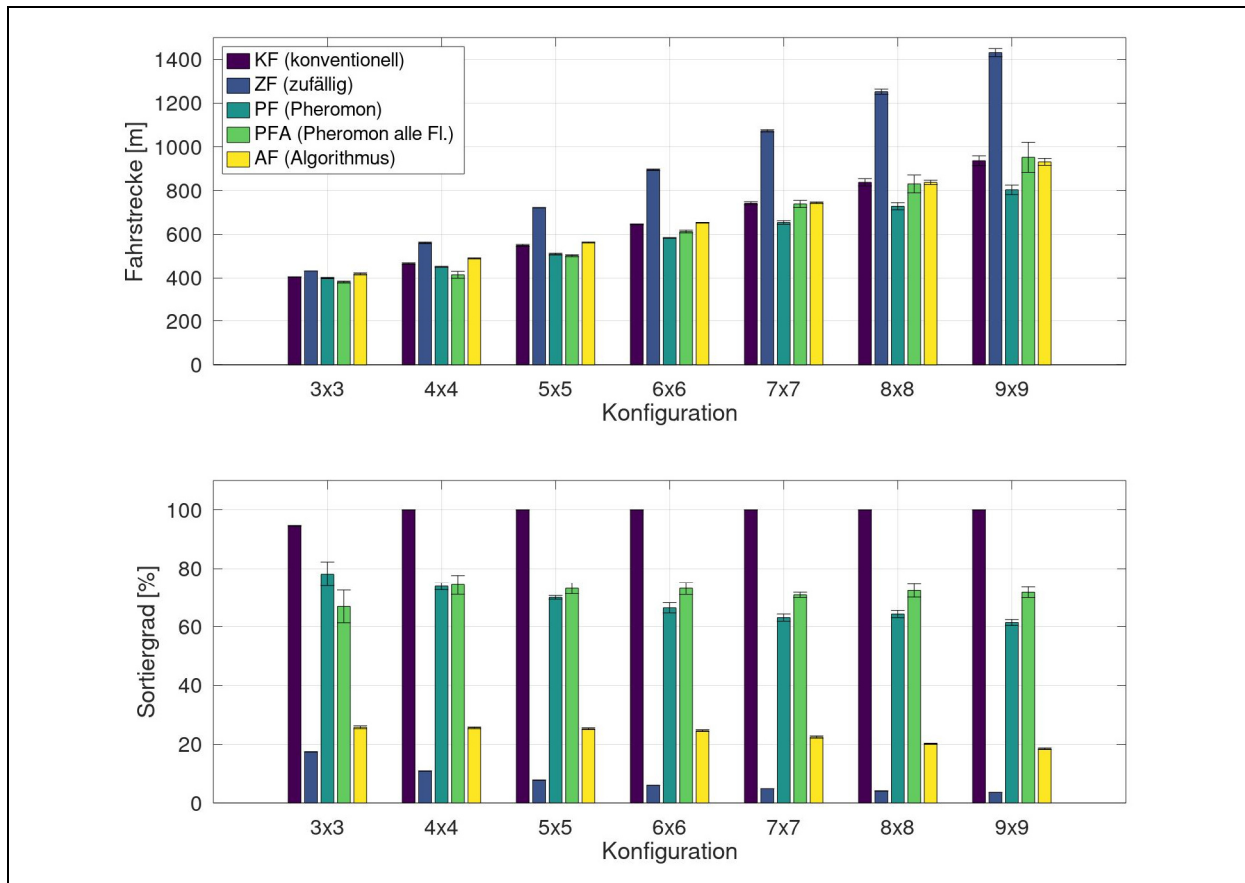
Fahrzeuggruppen $k$		Konfiguration						
		3x3	4x4	5x5	6x6	7x7	8x8	9x9
1	$\lambda^k$	16,66	13,5	11,33	9,76	8,57	7,64	6,89
	$D^k$	30	30	30	30	30	30	30
2	$\lambda^k$	33,33	27	22,67	19,52	17,14	15,28	13,78
	$D^k$	20	23,33	25	26	26,66	27,14	27,5
3	$\lambda^k$	50	40,5	34	29,29	25,71	22,92	20,67
	$D^k$	10	16,66	20	22	23,33	24,28	25
4	$\lambda^k$	-	54	45	39,05	34,29	30,56	27,57
	$D^k$		10	15	18	20	21,42	22,5
5	$\lambda^k$	-	-	56,67	48,81	42,86	38,19	24,44
	$D^k$			10	14	16,66	18,57	20
6	$\lambda^k$	-	-	-	58,57	51,43	45,83	41,33
	$D^k$				10	13,33	15,71	17,5
7	$\lambda^k$	-	-	-	-	60	53,47	48,22
	$D^k$					10	12,85	15
8	$\lambda^k$	-	-	-	-	-	61,11	55,11
	$D^k$						10	12,5
9	$\lambda^k$	-	-	-	-	-	-	62
	$D^k$							10
Gesamt mittlere Ankunfts menge		100	135	170	205	240	275	310

In allen Simulationsläufen wurde eine Evaporationskonstante  $\alpha = 500$  genutzt. Für alle Konfigurationen beträgt der Anfangsbestand jeder Fahrzeugklasse (HMD-Kombination) 1000 Fahrzeuge. Somit wächst der Gesamtanfangsbestand mit der Größe der Szenario-Konfiguration. Dieselben Gewichtungsfaktoren, wie bei der vorherigen Analyse, wurden verwendet ( $\gamma_{1-3} = 0,1$  und  $\gamma_4 = 0,4$ ). Die Quellen und Senken wurden in den jeweiligen Konfigurationen ähnlich wie in der Abbildung 50 angeordnet. Die Fahrzeugsenken befinden sich direkt an der ersten Reihe der Lagerflächen, während die Quellen oberhalb der letzten Reihe paralleler Lagerflächen angeordnet sind.

Als Benchmarks wurden erneut eine Zufallszuordnung (ZV), eine konventionelle Zuordnung (KF) und der unter 6.1.1 vorgestellte Algorithmus (AF) verwendet. Bei der konventionellen Zuordnung wurden die jeweiligen „high-runner“ Destinationen mit hoher Anlieferungsfrequenz und kurzen Standzeiten den senkennahen Lagerflächen zugeordnet und umgekehrt. Für Situationen der Kapazitätsüberlastung existieren auch in diesem Szenario sekundäre Flächenzuordnungen. Die sekundären Flächenzuweisungen sind umgekehrt zu den primären Zuweisungen. So hat z.B. eine „low-runner“ Destination als mögliche Ausweichflächen senkennahe Lagerflächen und umgekehrt. Wie bei der vorherigen Analyse ist die Basisvariante der pheromonbasierten Flächenzuordnung auf die vordefinierten Lagerbereiche beschränkt, um eine faire Vergleichbarkeit sicherzustellen. In der Basisvariante können keine

Fahrzeuge eines OEM in zugewiesenen Flächen eines anderen OEMs zugewiesen werden. In einer zweiten Variante der PF wurde diese Bedingung aufgehoben, um den Einfluss auf die Leistungsfähigkeit zu untersuchen. Diese zweite Variante wird im folgenden PFA genannt.

Die Abbildung 56 zeigt die zusammengefassten Simulationsergebnisse für die Läufe in den verschiedenen Konfigurationen und Zuordnungsmethoden. Jeder Punkt in dem Diagramm steht für den Mittelwert der Fahrstrecken und Sortiergrade aller Simulationsläufe für eine Konfigurationsinstanz.



**Abbildung 56: Simulationsergebnisse bei zunehmender struktureller Komplexität**

Auch hier zeigen die Fehlerindikatoren die zugehörige Standardabweichung an. Bei der Betrachtung der realisierten Fahrstrecken fällt auf, dass auch in diesem Szenario die ZF erwartungsgemäß für alle Konfigurationen zu den weitesten Fahrstrecken führt. Hierbei ist der Unterschied zu den anderen Methoden in den weniger komplexen Szenarien (z.B. 3x3 oder 4x4) geringer. Er steigt jedoch exponentiell mit der Szenariogröße. Die algorithmische Zuordnung AF und die konventionelle Zuordnung führen zu nahezu identischen Ergebnissen hinsichtlich der durchschnittlichen Fahrstrecke. Im Vergleich zwischen den konventionellen Zuordnungen (AF und KF) und der Selbststeuerung führt die konventionelle Zuordnung in allen Konfigurationen zu längeren durchschnittlichen Fahrwegen. Auch hier ist der Unterschied der



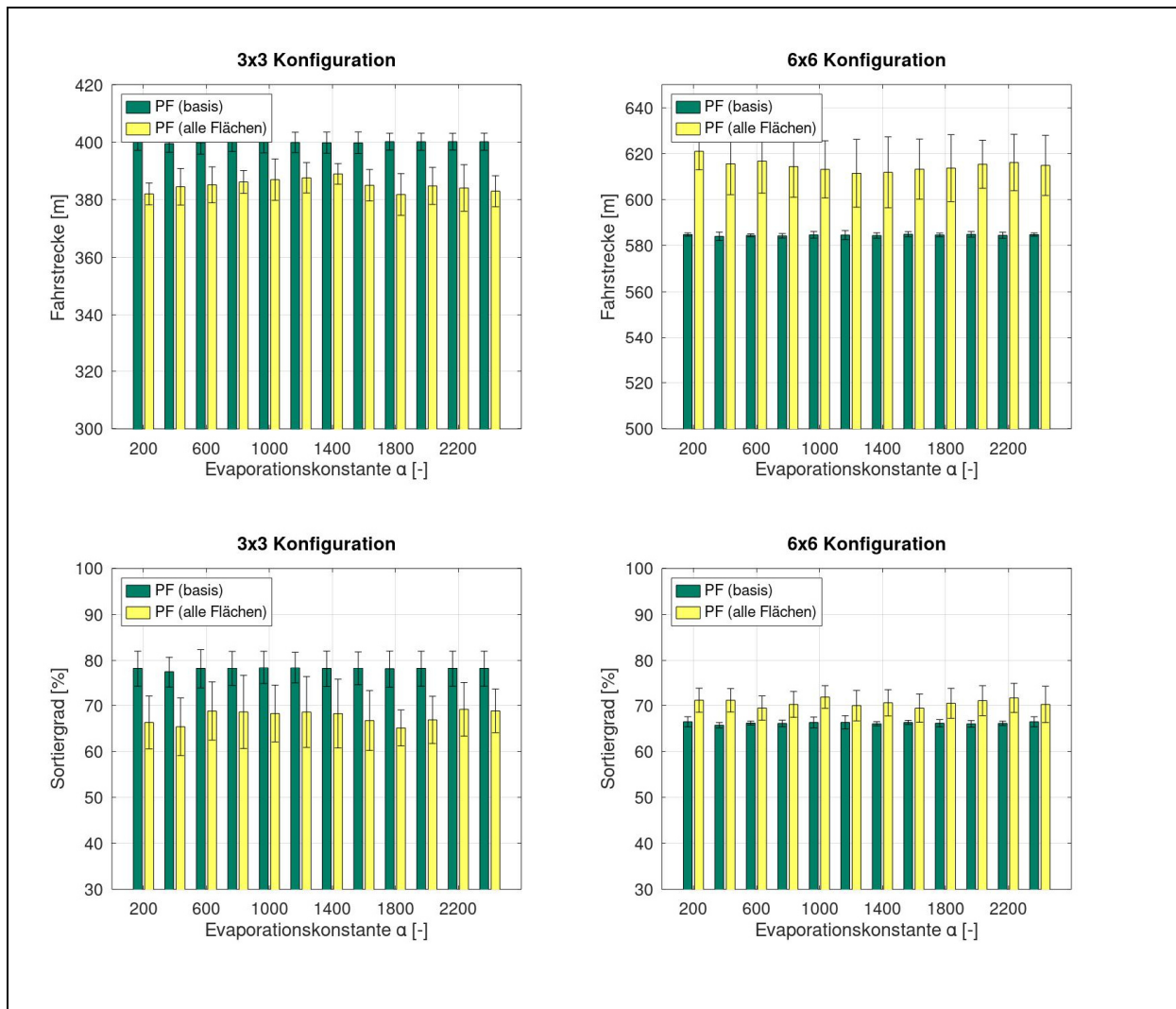
---

Ergebnisse bei Konfigurationen mit geringer Komplexität (3x3 oder 4x4) klein. Die Abbildung 56 zeigt deutlich, dass diese Differenz mit zunehmender Szenariokomplexität wächst. Je höher die strukturelle Komplexität, desto wirkungsvoller reduziert die PF die beobachteten Fahrstrecken. Hinsichtlich der Sortiergrade führt die KF zu den besten Ergebnissen. Durch die Flächengröße und die Szenarioparameterisierung wurden in allen Konfigurationen nur sehr selten minimale Kapazitätsüberschreitungen erzeugt. Die stärkste Überschreitung ist in dem 3x3 Szenario zu beobachten. Daher wurden hier am häufigsten Sekundärflächen bei der KF genutzt. In den übrigen Konfigurationen konnten die Fahrzeugvolumina in den meisten Fällen gemäß der geplanten Zuordnung zugewiesen werden. Hieraus resultiert ein erwarteter hoher Sortiergrad nahe von 100 % bei der KF. Anders verhält es sich bei der algorithmischen Zuordnung (AF). Wie bereits mehrfach beschrieben, zielt der Zuordnungsalgorithmus nicht explizit auf die blockweise Sortierung der Fahrzeuggruppen. Daher erzielt der algorithmische Ansatz erwartungsgemäß geringe Sortiergrade. Die Selbststeuerungsmethoden führten hingegen zu hohen Sortiergraden zwischen 70-80 %, welche aber unterhalb der KF Methode liegen. Dieser niedrigere Sortiergrad wird konzeptionsgemäß für die Realisierung möglichst geringer Fahrstrecken in Kauf genommen. Die PF Methode ermöglicht, dass Fahrzeuge verschiedener Gruppen einer gemeinsamen Lagerfläche zugewiesen werden können. Hierdurch wird der flächenbasierte Sortiergrad, welcher die Anzahl der am häufigsten vorkommenden Fahrzeugkategorie in einer Lagerfläche im Verhältnis zur Gesamtzahl Fahrzeuge auf der jeweiligen Lagerfläche in Relation setzt, geringer. Eine genauere Betrachtung des reihenbasierten Sortiergrads (Gleichung (5)) gibt daher weiteren Aufschluss über die Sortiergüte. Der reihenbezogene Sortiergrad lag bei allen Simulationsläufen für die KF und die PF bei 100 %. Daher können die ausgewiesenen Sortiergrade insgesamt als sehr hoch angesehen werden. Es wurden keine Fahrzeuge verschiedener Kategorien in den Reihen gemischt.

Bei näherer Betrachtung der Abbildung 56 können weitere interessante Effekte hinsichtlich der Fahrstrecken und Sortiergrade beobachtet werden. In weniger komplexen Situationen führt die PFA zu besseren Fahrwegergebnissen, während ab einer Szenariogröße von 6x6 die PF bessere Ergebnisse generiert. Dieses Ergebnis ist zunächst unerwartet, da die PFA Methode potenziell mehr Lagerreihen zur Auswahl und somit mehr Optimierungsalternativen hat. Folglich könnte erwartet werden, dass die PFA tendenziell Reihen mit kürzeren Fahrwegen finden kann. Auch hätte erwartet werden können, dass die Sortiergrade bei der PFA Methode geringer sind als bei der PF. Diesbezüglich zeigt die Abbildung 56 ein ähnliches Bild. In weniger komplexen Situationen wird diese Erwartung bestätigt, während bei Konfigurationen ab 5x5 die PFA Methode zu höheren Sortiergraden führt. Eine Ursache für diese unerwarteten Ergebnisse könnte in der Parametrisierung der Selbststeuerungsmethoden vermutet werden. Sowohl die Gewichtungsfaktoren als auch die Evaporationskonstante stellen essenzielle

Parameter der Methode dar und können ihr Verhalten beeinflussen. Die folgende Abbildung 57 zeigt exemplarisch die Ergebnisse für Simulationsläufe in dem 3x3 und dem 6x6 Szenario für variierende Evaporationskonstanten dar.

Die Abbildung 57 zeigt, dass die Evaporationskonstante insbesondere bei der PFA Methode einen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit hat. So liegt in dem 3x3 Szenario beispielsweise bei einem Wert von  $\alpha = 1400$  die längste durchschnittliche Fahrstrecke und bei  $\alpha = 200$  werden die kürzesten Wege generiert. Anders verhält es sich bei der PF Methode.



**Abbildung 57: Simulationsergebnisse für variierende Evaporationskonstanten**

Hier scheint der Einfluss der gewählten Evaporationskonstanten geringer zu sein. Besonders bei Betrachtung der Ergebnisse der 6x6 Konfiguration wird deutlich, dass hier die PF Methode zu nahezu konstanten Ergebnissen führt, während die PFA Methode sich sensitiv gegenüber der Evaporationskonstante zeigt. Die durchschnittlichen Fahrstrecken sinken mit zunehmender Evaporationskonstante  $\alpha$ . Die beobachteten Fahrstrecken liegen über denen der PF. Die

---

Beobachtungen für den Sortiergrad in Abbildung 57 ergeben ein ähnliches Bild. Diese Betrachtung bestätigt, dass die Evaporationskonstante einen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit der Methode hat. Für eine gesicherte Beurteilung der Wirkung der Parameter auf die Gesamtleistungsfähigkeit der neuen Selbststeuerungsmethoden ist allerdings eine weitere systematische Analyse notwendig.

Unabhängig hiervon kann an dieser Stelle die Evaluationshypothese H2 abschließend bestätigt werden. Die neuen pheromonbasierten Selbststeuerungsmethoden tragen dazu bei, bei steigender struktureller Komplexität die logistische Leistungsfähigkeit im Sinne der definierten Zielgrößen zu steigern.

### 6.1.7 Untersuchung der Leistungsfähigkeit des integrativen Ansatzes

In einer abschließenden Analyse des generischen Terminalmodells soll zunächst die Leistungsfähigkeit des integrativen Ansatzes (Lager- und Verkehrsmittelzuordnung) analysiert werden. Ausgehend von dieser Betrachtung soll eine systematische Analyse der Wirkung der Gewichtungsfaktoren und der Evaporationskonstante erfolgen.

Als Ausgangspunkt für die Analysen wurde eine Terminalkonfiguration mit 6x6 Lagerflächen gewählt. Im Vergleich zu den vorherigen Szenarien wurden die Dimensionen der Lagerflächen leicht modifiziert ( $w = 160m$ ,  $h = 70m$  und  $r = 3.4m$ ). Somit beträgt die Kapazität einer Fläche 611 Fahrzeuge. Die Kapazität des Terminals beträgt ca. 22.000 (21.996) Fahrzeuge. Wie auch bei der vorherigen Betrachtung existiert für jede parallele Lagerflächenanordnung ein OEM (OEM1-OEM6). Hierbei bedient jeder OEM sechs verschiedene Destinationen (D1-D6). Der Einfachheit halber werden die Modelle der OEM nicht weiter unterschieden. Somit existieren für dieses Szenario insgesamt 36 HMD-Kombinationen. Die Eingangsfunktionen der Fahrzeuge werden analog zu den vorherigen Analysen als sinusförmige Einlastungsfunktionen modelliert. Die Tabelle 11 zeigt detailliert die Einlastungsparameter und die Verweildauern der Fahrzeuggruppen auf dem Terminal. Um möglichst realistische Dynamiken im Zu- und Abgangverhalten zu erzeugen und um den kombinierten Einsatz von pheromonbasierter Flächen- und Verkehrsmittelzuweisung zu ermöglichen, werden die Abgänge schiffsweise modelliert. Unterschieden werden kann zwischen drei Schiffgruppen (R1-R3), welche nach der Art der zusammen transportierten Destinationen gebildet werden. Die nachstehende Tabelle 12 zeigt die Eigenschaften dieser Schiffgruppen.

**Tabelle 11: Einlastungsparameter und Lagerdauer**

OEM	Destination	Schiffsgruppe	Ø Ank. Vol.	Ampl.	Rel. Phasenversatz	Ø Lagerdauer
OEM1	D1	R3	47,62	45,24	0	10
	D2	R3	38,1	36,2	0,2	15
	D3	R2	28,57	27,14	0,4	20
	D4	R2	19,05	18,1	0,6	25
	D5	R1	9,52	9,04	0,8	30
	D6	R1	57,14	54,28	1	5
OEM2	D1	R3	38,1	36,2	0	15
	D2	R3	28,57	27,14	0,2	20
	D3	R2	19,05	18,1	0,4	25
	D4	R2	9,52	9,04	0,6	30
	D5	R1	57,14	54,28	0,8	5
	D6	R1	47,62	45,24	1	10
OEM3	D1	R3	28,57	27,14	0	20
	D2	R3	19,05	18,1	0,2	25
	D3	R2	9,52	9,04	0,4	30
	D4	R2	57,14	54,28	0,6	5
	D5	R1	47,62	45,24	0,8	10
	D6	R1	38,1	36,2	1	15
OEM4	D1	R3	19,05	18,1	0	25
	D2	R3	9,52	9,04	0,2	30
	D3	R2	57,14	54,28	0,4	5
	D4	R2	47,62	45,24	0,6	10
	D5	R1	38,1	36,2	0,8	15
	D6	R1	28,57	27,14	1	20
OEM5	D1	R3	9,52	9,04	0	30
	D2	R3	57,14	54,28	0,2	5
	D3	R2	47,62	45,24	0,4	10
	D4	R2	38,1	36,2	0,6	15
	D5	R1	28,57	27,14	0,8	20
	D6	R1	19,05	18,1	1	25
OEM6	D1	R3	57,14	54,28	0	5
	D2	R3	47,62	45,24	0,2	10
	D3	R2	38,1	36,2	0,4	15
	D4	R2	28,57	27,14	0,6	20
	D5	R1	19,05	18,1	0,8	25
	D6	R1	9,52	9,04	1	30

Die Zuordnung von Fahrzeugen zu Schiffen erfolgt nach dem FIFO-Prinzip. Das Ankunftsverhalten der Schiffe wurde folgendermaßen modelliert: in einem ersten Schritt wird das zu ladende Volumen über eine Zufallszahl normalverteilt generiert. Die Fahrzeuge werden dem Schiff gemäß dem FIFO-Prinzip mit gleichverteilten Lagerdauer (siehe Tabelle 11) zugeordnet. Das Schiff wird zu dem Zeitpunkt erzeugt, zu dem die Lagerdauer des letzten zugeordneten Fahrzeugs erreicht ist.

**Tabelle 12: Schiffsgruppen und Parameter**

Schiffsgruppe	Mittlere Fahrzeuganzahl	Standardabweichung	Destinationen
R1	1000	150	D5, D6
R2	1000	150	D3, D4
R3	1000	150	D1, D2

Als Benchmarkmethoden für die Lagerflächenzuordnung werden, wie in den vorangegangenen Analysen, die konventionelle, die algorithmische Zuordnung (Cordeau-Heuristik) und die zufällige Lagerzuordnung verwendet. Für die konventionelle Zuweisung wird für jede HMD-Kombination eine primäre Lagerfläche gemäß ihrer Lagerdauer und ihres mittleren Eingangsvolumens bestimmt. Fahrzeuge mit niedriger Umschlaghäufigkeit (lange Lagerdauer und geringes Eingangsvolumen) werden Flächen in weiterer Entfernung zu den Kajen zugeordnet und umgekehrt. Die Fahrzeuge eines OEM können in Überlaufsituationen in die Flächen desselben OEMs ausweichen. Hierbei besteht eine umgekehrte Präferenz für die Flächen: eine HMD-Kombination mit hohem Eingangsvolumen und kurzen Standzeiten wird möglichst kajennahe Flächen präferieren, während Fahrzeuggruppen mit geringerer Umschlaghäufigkeit weiter entfernte Flächen präferiert. Wie bei den vorangegangenen Analysen werden den eingehenden Fahrzeugen bei der zufälligen Zuordnung (ZF) mittels einer Gleichverteilung freie Reihen zugewiesen.

In diesem Szenario werden Schiffe wie beschrieben als eigenständige Objekte modelliert. Sie sollen mittels der pheromonbasierten Verkehrsmittelzuordnung zu den Kajen zugewiesen werden (PV). Um einen Vergleich mit klassischen Planungsmethoden zu ermöglichen, werden als konventionelle Liegeplatzplanungsmethode der in 6.1.2 beschriebenen algorithmische Basisansatz (BV), der DBAP-Algorithmusansatz (AV) (siehe ebenfalls 6.1.2) und ein präferenzbasierter Ansatz (KV) verwendet. Bei dem präferenzbasierten Ansatz werden die Liegeplätze den Schiffen auf Basis einer Schätzung zugewiesen. Den Schiffsgruppen werden, nach den erwarteten Volumenverteilungen, vergleichbar einer forecastbasierten Planung, der HMD-Kombinationen (siehe Tabelle 11) und der Kenntnis bezüglich Lagerzuordnung den Liegeplätzen zugewiesen. Der Basisalgorithmusansatz hingegen entscheidet situativ für jedes ankommende Schiff neu und weist den Schiffen einen Liegeplatz zu. Der komplexere DBAP-Algorithmus (AV) wurde als rollierender Algorithmus implementiert, wie er in Kapitel 6.1.2 beschrieben wurde. Hierbei werden die Schiffe, welche aus dem Vorhorizont noch in der Bearbeitung sind, wiederum als Anfangsbelegung der Kajen gesetzt. Die Parameter, welche für den AV gesetzt wurden, werden in der Tabelle 13 zusammengefasst.

**Tabelle 13: Parameter der Liegeplatzzuordnung**

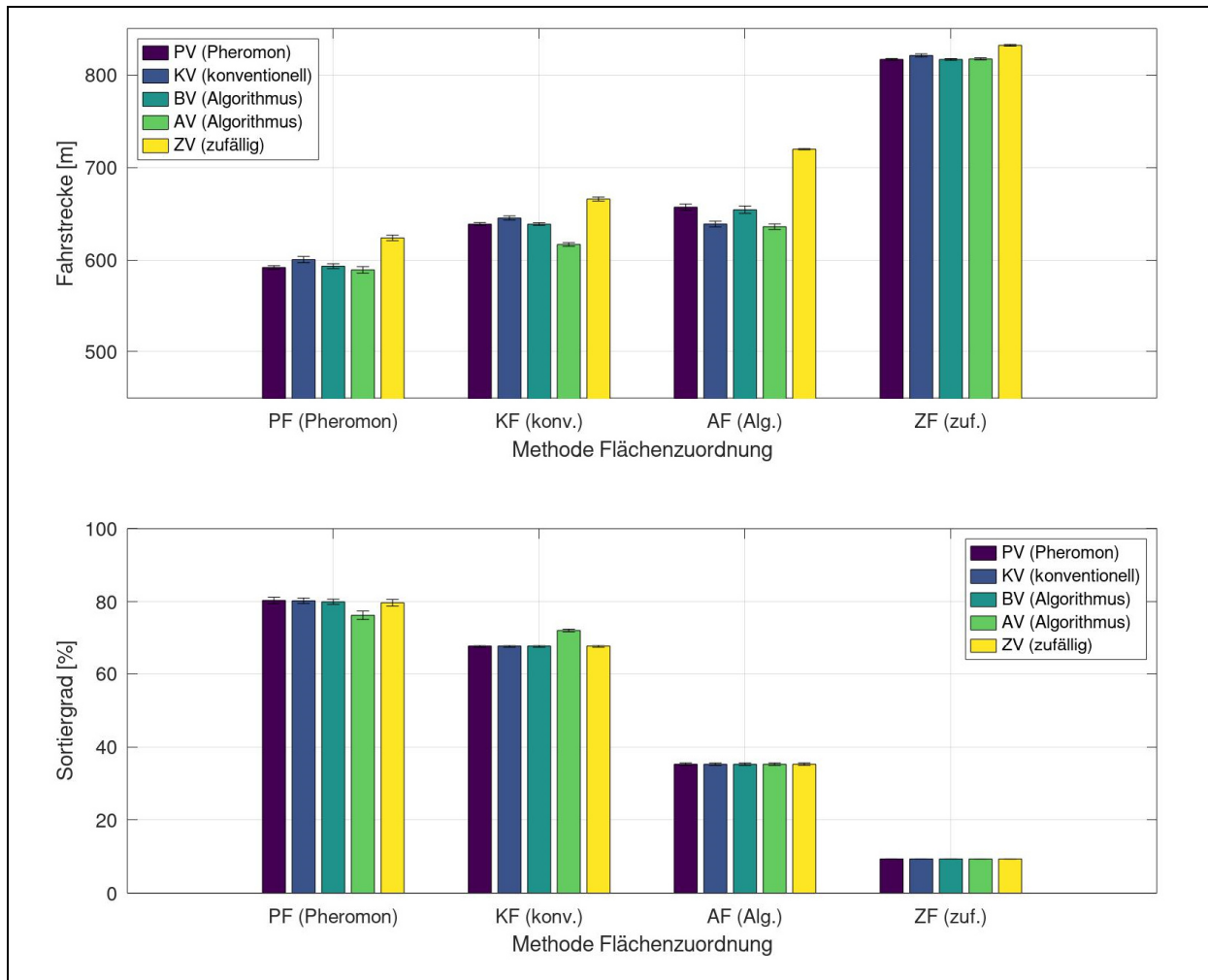
<b>Parameter</b>	<b>Ausprägung</b>
Planungszeitraum (rollierender Zeithorizont)	96 h
Start Temperatur	5000
End Temperatur	1000
Cooling Rate	0,99
$\beta_{\min}$	2
$\beta_{\max}$	3

---

Neben der AV wird ebenfalls eine zufällige Liegeplatzzuordnung als obere Grenze eingeführt. Hierbei werden Schiffe mittels einer gleichverteilten Zufallszahl auf den nächsten freien Liegeplatz zugeordnet.

In den durchgeführten Simulationsläufen wurden die Gewichtungswerte für Lagerzuordnung folgendermaßen definiert:  $\gamma_1 = 0,3$ ,  $\gamma_2 = 0,15$ ,  $\gamma_3 = 0,15$  und  $\gamma_4 = 0,4$ . Die Evaporationsparameter für die Lagerzuordnung wurden im Bereich von 800 bis 2200 variiert und der Evaporationsparameter für die Liegeplatzzuordnung im Bereich von 200 bis 1400. Um hinreichende Simulationsreplikationen zu generieren, wurden je Kombination (Parameter und Methodenkombinationen) 10 Läufe mit unterschiedlichen Zufallszahlen durchgeführt. Insgesamt umfasst diese Analyse 1.000 verschiedene Simulationsläufe über einen Zeitraum von einem Jahr. Gemäß der gewählten Einlastungsfunktionen umfasst jeder Simulationslauf ein Fahrzeugvolumen von ca. 456.000 Fahrzeugen und 445 Schiffe. Somit ist das Verhältnis von Fahrzeugvolumen und Schiffsanläufen auch vergleichbar zum realen Terminalbeispiel.

Die Abbildung 58 zeigt die Zusammenfassung aller Simulationsergebnisse hinsichtlich der Fahrstrecken und des realisierten Sortiergrads. Hierbei stellen die Diagramme alle Kombinationsmöglichkeiten zwischen den Lager- und den Verkehrsmittelzuweisungsmethoden dar. Sofern die Ergebnisse sich auf die pheromonbasierten Selbststeuerungsmethoden beziehen, zeigt die Darstellung die Simulationsläufe mit der Evaporationskonstante, welche die jeweils beste Zielerreichung generierte. Der Einfluss der Evaporationskonstante wird anschließend gesondert evaluiert. Auch in den folgenden Diagrammen geben die Fehlerindikatoren Aufschluss über die Standardabweichungen der zugehörigen Replikationsläufe. Die Abbildung zeigt, dass hinsichtlich beider Zielgrößen die besten Ergebnisse bei einer Kombination von PF und PV erzielt wurden. Allerdings führte die Kombination von PF mit der AV und BV zu nahezu identischen Ergebnissen. Die Kombination mit der forecastbasierten Liegeplatzzuordnung (PF mit KV) führt zu längeren Fahrstrecken. Erwartungsgemäß generiert die zufällige Liegeplatzzuordnung in Kombination mit allen Lagerzuordnungsmethoden zu den längsten Fahrstrecken. Im Vergleich zur selbststeuernden Flächenzuordnung (PF) führt die konventionelle Zuordnung (KF) in Kombination mit der klassischen Liegeplatzzuordnung (KV und AV) zu längeren durchschnittlichen Fahrwegen. Hierbei können für die Kombination von KF mit der AV die besten Ergebnisse in dieser Gruppe beobachtet werden. Die Kombination von KF und PV erhöht beide Zielwerte leicht, während die zufällige Liegeplatzzuordnung (ZV) auch in Kombination mit der KF zu den schlechtesten Ergebnissen führt. Die Abbildung zeigt weiterhin, dass die Ergebnisse der heuristischen Flächenzuordnung (AF) und der KF-Methode vergleichbar sind. Allerdings liegen die Fahrwegergebnisse für alle Liegeplatzmethoden in dieser Gruppe leicht über denen der KF-Methode.



**Abbildung 58: Simulationsergebnisse in dem 6x6-Szenario**

Die geringste Differenz kann bei der algorithmischen Liegeplatzzuordnung (AV) gefunden werden. Interessanterweise hat insbesondere bei der AF Methode die Liegeplatzwahl einen starken Einfluss auf das Ergebnis der Fahrstrecken. So werden beispielsweise bei der zufälligen Liegeplatzzuordnung besonders lange Fahrstrecken generiert. Ebenfalls interessant sind die Ergebnisse bei der Kombination mit der pheromonbasierten Liegeplatzmethode. Auch hier sind die realisierten Fahrwege länger als bei den anderen Flächenzuordnungsmethoden. Eine mögliche Erklärung liegt in Zuordnungslogik der Heuristik. Sie versucht situativ die Strecken für jeden Planungshorizont zu minimieren. Sie berücksichtigt hierbei nicht die Zuordnungen vorangegangener Gruppen. Somit können Fahrzeuggruppen stark in der Fläche verteilt werden. Die pheromonbasierte Liegeplatzzuweisung hingegen versucht auf der Basis von vorangegangenen Verladungen sinnvolle Liegeplätze anhand der durchschnittlichen Lagerpositionen der Fahrzeuggruppen zu antizipieren. Dieser grundsätzliche konzeptionelle Unterschied kann diesen Effekt erklären.

---

Hinsichtlich der zufälligen Lagerzuordnung wurden für alle Läufe die längsten Fahrwege beobachtet. In dieser Gruppe (ZF-Kombinationen) führt die Kombination mit AV zu den geringsten Werten.

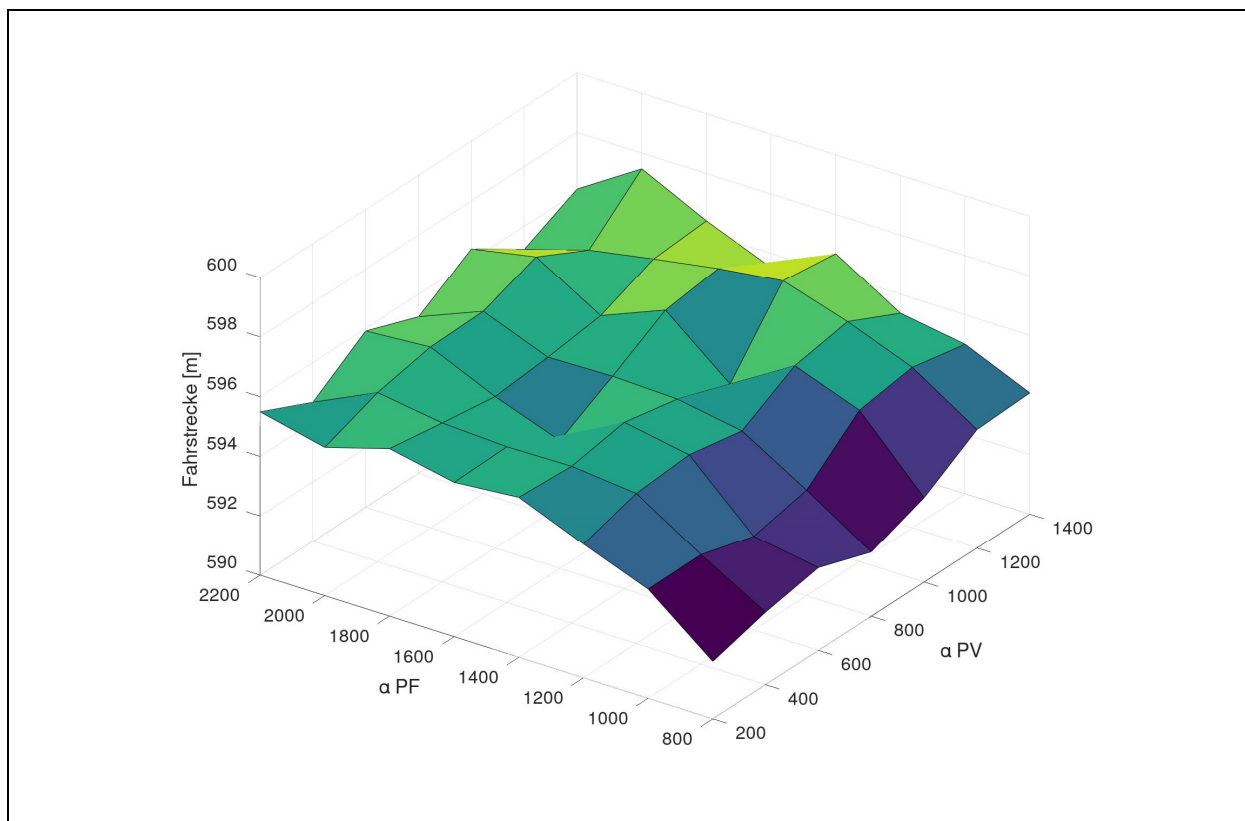
Bei der Betrachtung der Sortiergrade ergibt sich ein gleichmäßiges Bild. Hier führen die Kombinationen von Verkehrsmittelmethode mit einer Lagerzuordnungsmethode zu fast identischen Ergebnissen mit keinen signifikanten Abweichungen. Dieses Ergebnis kann damit erklärt werden, dass bei den Liegeplatzmethoden die Lagersortierung konzeptionsgemäß nicht beeinflusst wird. Zum Zeitpunkt der Liegeplatzzuordnung wurde die Sortierung bereits vollständig durch die Lagerzuordnung determiniert. Bei der Selbststeuerung ist eine offene Rückkopplung zwischen Lagerzuordnung und Liegeplatzwahl denkbar. Dennoch sind auch bei der Selbststeuerung nahezu identische Sortiergrade zu beobachten. Insgesamt führt die Selbststeuerung zu den höchsten Sortiergraden. Durch die zeitliche Verteilung in dem Szenario und den gewählten Amplituden wurden kontinuierlich in der Simulationszeit temporäre Überlastsituationen erzeugt. Daher führt die KF Methode zu einer höheren Durchmischung der Fahrzeuge durch die Nutzung von sekundären Flächenzuweisungen in den Überlastungssituationen. Die pheromonbasierte Selbststeuerungsmethode scheint die Dynamik der temporären Überlastungssituationen besser verarbeiten zu können. Trotz der auftretenden Lastspitzen führt sie zu einem flächenbasierten Sortiergrad von 80 %. Die konventionelle Zuordnung führt ebenfalls zu hohen Sortiergraden. Dies liegt an der konzeptionellen Ausrichtung der Methode, indem im Voraus anhand der Forecastdaten den Fahrzeuggruppen feste Bereiche zugewiesen wurden und somit eine entsprechende Sortierung determiniert ist, welche nur lediglich in Überlastungssituationen verletzt wird. Anders verhält es sich bei der algorithmischen Flächenzuordnung (AF). Wie bereits mehrfach diskutiert, ist die Einhaltung eines Sortiergrads auf der Ebene eines Lagerblocks nicht Bestandteil der Zielfunktion (siehe 6.1.1). Folglich wird dieser Aspekt bei der Zuordnungsentscheidung nicht berücksichtigt und somit wird erwartungsgemäß ein geringerer Sortiergrad auf Flächenebene erzielt. Der algorithmische Ansatz lässt die Sortierung dennoch nicht außer Acht: konzeptionsgemäß zielt der Algorithmus auf einer reihenreinen Zuweisung von Fahrzeugen. Dies zeigt sich in dem hohen Sortiergrad auf Reihenbasis für die algorithmische Zuordnung (94,93 %). Lediglich in Überlastsituationen mussten Reihen temporär durchmischt werden.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass die Kombination beider pheromonbasierter Methoden zu den besten Ergebnissen hinsichtlich des Sortiergrads und der realisierten Fahrstrecken geführt hat. Hierbei zeigt die Abbildung 58, wie bereits beschrieben die jeweils besten Ergebnisse der neuen Selbststeuerungsmethoden mit unterschiedlichen Ausprägungen der Evaporationskonstante dar. Um das Bild der Analyse zu vervollständigen,



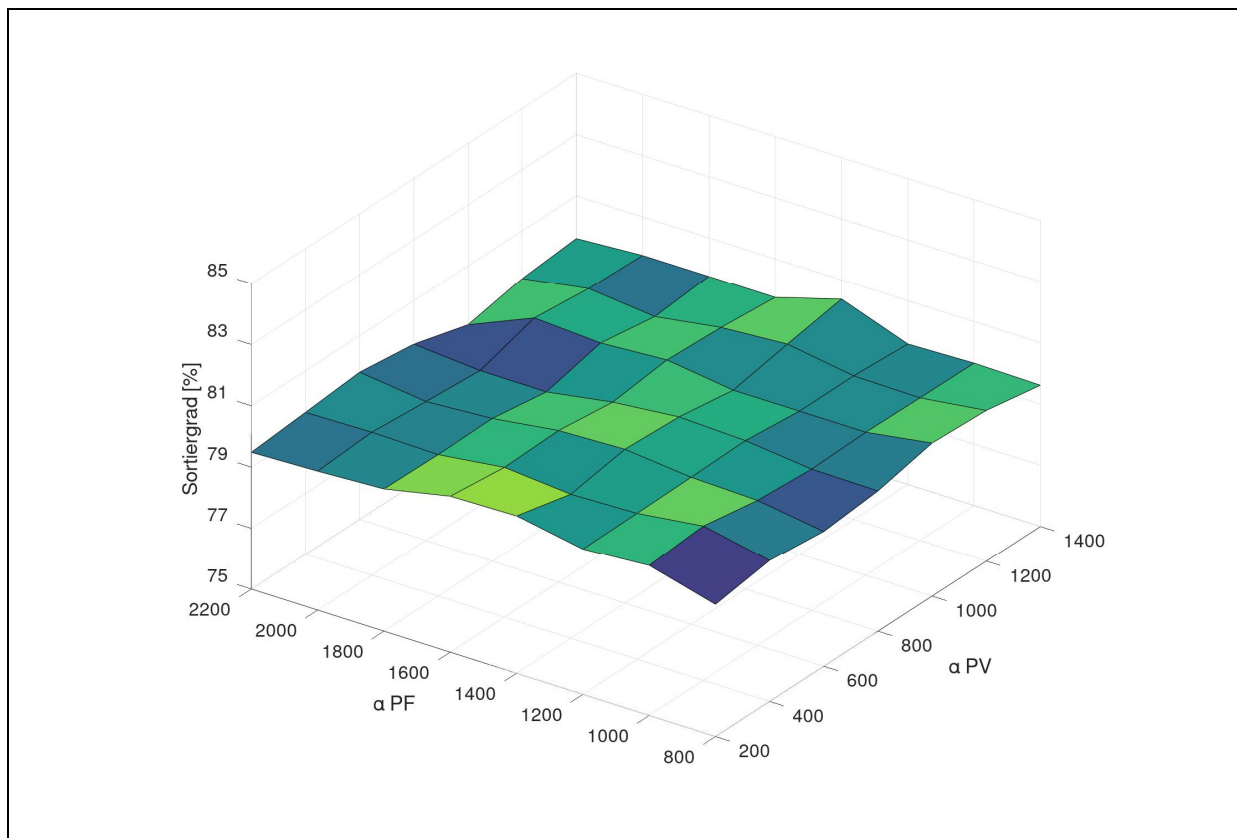
zeigen die Abbildung 59 und Abbildung 60 nun die detaillierten Simulationsergebnisse für alle durchgeführten Simulationsläufe für die pheromonbasierten Methoden. Bei den Läufen wurden die Evaporationskonstanten für die Flächenzuordnung und die Liegeplatzzuordnung systematisch variiert, um den Einfluss dieses Parameters genauer zu betrachten.

Die Abbildung 59 zeigt die Ergebnisse für die Fahrwege. Es ist deutlich zu erkennen, dass beide Parameter die durchschnittliche Fahrstrecke beeinflussen. In diesem Fall werden die kürzesten Fahrwege bei kleineren Werten der Evaporationskonstante realisiert. Insbesondere mit zunehmenden Werten für die PV steigen die durchschnittlichen Fahrstrecken stärker an. Auch für die Steigerung von  $\alpha_{PF}$  Werten kann eine Erhöhung der durchschnittlichen Fahrstrecke erkannt werden. Allerdings ist diese niedriger als bei der PV Methode. Anders verhält es sich bei den beobachteten Sortiergraden.



**Abbildung 59: Fahrwege bei veränderten Evaporationskonstanten**

Die Abbildung 60 zeigt die beobachteten Sortiergrade bei allen Kombinationen. Der Einfluss der Evaporationskonstanten auf den Sortiergrad scheint gering zu sein. Die Sortiergrade zeigen keine signifikante Veränderung gegenüber einer Veränderung der Evaporationskonstante. Hinsichtlich der PV wurde bereits vermutet, dass die Liegeplatzwahl keinen Einfluss auf die Lagerzuordnung hatte. Dies bestätigt die Abbildung 60.



**Abbildung 60: Sortiergrade bei veränderten Evaporationskonstanten**

Interessanterweise hat in diesem Fall aber auch die Evaporationskonstante der Lagerzuordnung einen sehr geringen Einfluss auf den Sortiergrad. Da diese aber andererseits einen erkennbaren Effekt auf die Fahrstrecken hat (siehe Abbildung 59), scheint sie zwar die Lageraufstellung in den Simulationsläufen zu verändern, aber hierbei nicht die Sortierung zu beeinträchtigen. Dies könnte konzeptionell durch die Gewichtungparameter der Lagerflächenfunktion zu erklären sein. Die Evaporationskonstante wirkt nicht direkt in den Termen, welche konzeptionell auf die Sortierung wirken sollen. Es kann vermutet werden, dass die Gewichtungparameter der einzelnen Terme hierbei eine größere Rolle spielen. Diese Gewichtungparameter wurden in diesen Simulationsläufen nicht verändert. Daher stützen die Beobachtungen aus den Abbildung 59 und Abbildung 60 die These, dass sich das Gesamtverhalten beider Methoden nur durch das Zusammenwirken der einzelnen Methodenparameter erklären lässt. Ob sich dieses Zusammenwirken gemäß der konzeptionellen Gestaltung parametrisieren lässt, ist eine weitere relevante Frage (siehe 5.5), welche im Folgenden durch eine systematische Analyse untersucht werden soll.

#### 6.1.8 Systematische Untersuchung des Parametereinflusses

Die vorstehende Analyse der Ergebnisse des integrativen Ansatzes zeigten, dass die wahlfreien Parameter des integrativen Steuerungsansatzes genutzt werden können, um die

---

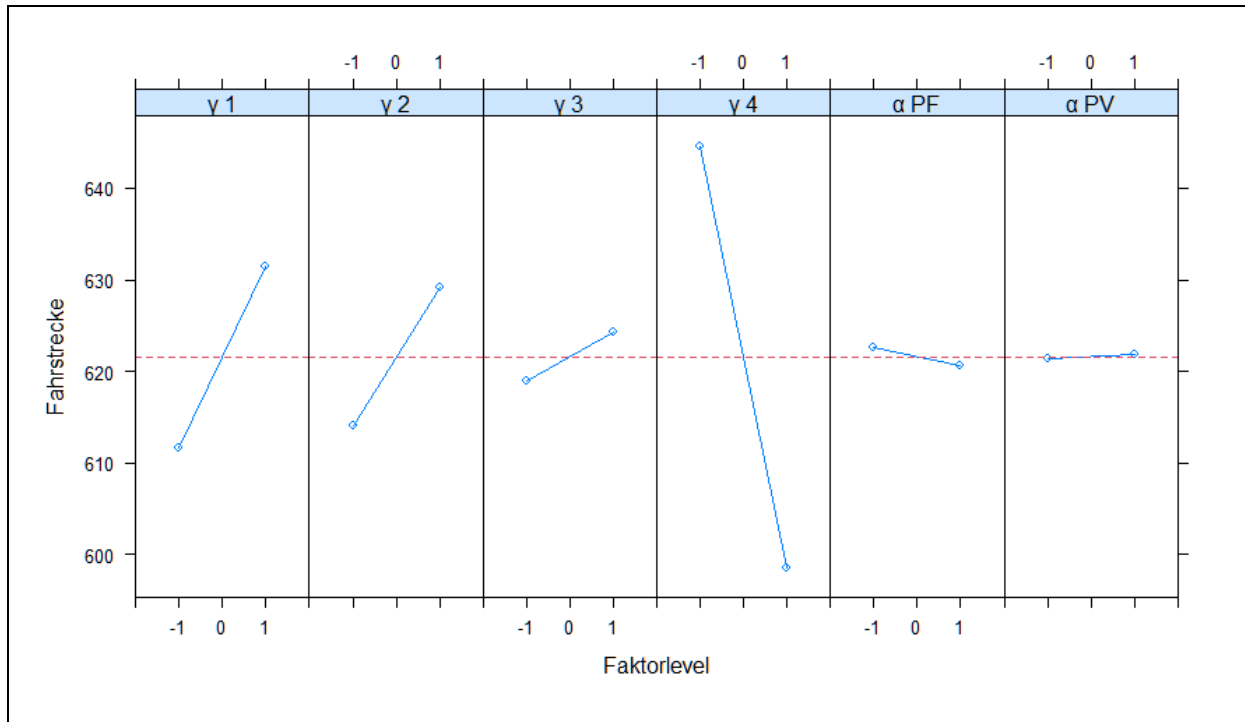
Leistungsfähigkeit der Methode bewusst zu verändern. Der Einfluss der Parameter und mögliche Kombinationseffekte sollen in der folgenden Analyse untersucht werden. Mittels eines vollfaktoriellen Versuchsplans sollen die Einflüsse systematisch adressiert werden. In der Analyse werden alle Parameter (Gewichtungsfaktoren und Evaporationskonstanten) einbezogen. Um die Zahl der Versuche möglichst gering zu halten, werden je Faktor zwei Ausprägungen zugrunde gelegt. Insgesamt ergeben sich daher bei sechs Faktoren 64 verschiedene Kombinationsmöglichkeiten. Wie in den vorangegangenen Analysen werden je Kombinationsmöglichkeit 10 verschiedene Zufallszahlenvarianten simuliert. Die Ergebnisse werden in Form eines Mittelwerts über die 10 Läufe zusammengefasst. Somit beinhaltet die Analyse insgesamt 640 Simulationsläufe. Die folgende Tabelle 14 fasst den durchgeführten vollfaktoriellen Versuchsplan zusammen und weist die Durchschnittsergebnisse für die 10 Läufe bezüglich der Fahrstrecken und der Sortiergrade aus.

Alle in der Tabelle definierten Simulationsläufe wurden mit der unter 6.1.7 beschriebenen Modellkonfiguration durchgeführt. Hinsichtlich der Gewichtungsfaktoren wurden als Faktorausprägungen 0,05 und 0,95 gewählt. Sie stellen somit die äußeren Randbedingungen des Gewichtungskonzepts, welches einen Wertebereich zwischen 0 und 1 vorsieht, dar. Für die Evaporationskonstanten wurden 500 und 2500 für  $\alpha_{PF}$  sowie 200 und 1500 für  $\alpha_{PV}$  gewählt. Die Werte für die Evaporationskonstanten wurden aufgrund der Ergebnisse der vorhergehenden Experimente gewählt.

Tabelle 14: Vollfaktorieller Versuchsplan

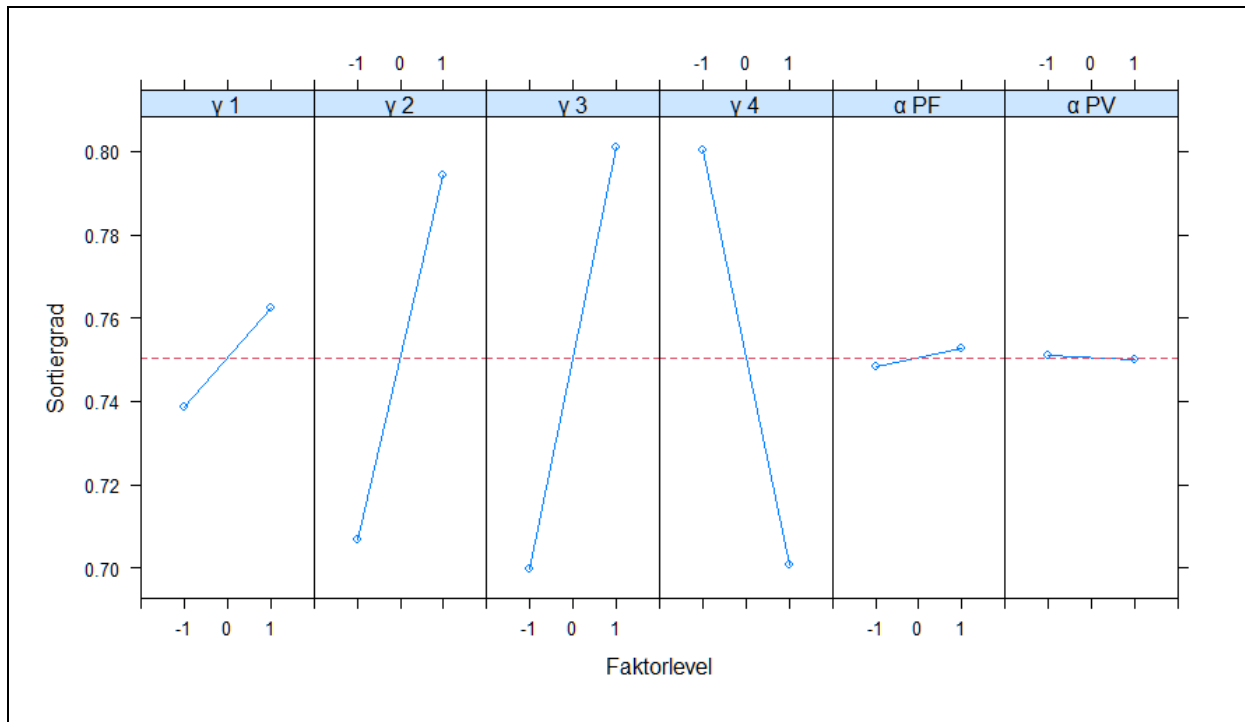
K	Läufe	Parameter Werte						Faktorlevel						Ergebnisse	
		Y <sub>1</sub>	Y <sub>2</sub>	Y <sub>3</sub>	Y <sub>4</sub>	α <sub>PF</sub>	α <sub>PV</sub>	Y <sub>1</sub>	Y <sub>2</sub>	Y <sub>3</sub>	Y <sub>4</sub>	α <sub>PF</sub>	α <sub>PV</sub>	FW [m]	SG [-]
1	10	0,05	0,05	0,05	0,05	500	200	-1	-1	-1	-1	-1	-1	623,16	0,83
2	10	0,95	0,05	0,05	0,05	500	200	1	-1	-1	-1	-1	-1	668,15	0,67
3	10	0,05	0,95	0,05	0,05	500	200	-1	1	-1	-1	-1	-1	639,93	0,76
4	10	0,95	0,95	0,05	0,05	500	200	1	1	-1	-1	-1	-1	653,77	0,79
5	10	0,05	0,05	0,95	0,05	500	200	-1	-1	1	-1	-1	-1	630,40	0,84
6	10	0,95	0,05	0,95	0,05	500	200	1	-1	1	-1	-1	-1	660,45	0,82
7	10	0,05	0,95	0,95	0,05	500	200	-1	1	1	-1	-1	-1	640,15	0,84
8	10	0,95	0,95	0,95	0,05	500	200	1	1	1	-1	-1	-1	651,06	0,84
9	10	0,05	0,05	0,05	0,95	500	200	-1	-1	-1	1	-1	-1	563,48	0,42
10	10	0,95	0,05	0,05	0,95	500	200	1	-1	-1	1	-1	-1	582,01	0,60
11	10	0,05	0,95	0,05	0,95	500	200	-1	1	-1	1	-1	-1	605,38	0,73
12	10	0,95	0,95	0,05	0,95	500	200	1	1	-1	1	-1	-1	622,49	0,78
13	10	0,05	0,05	0,95	0,95	500	200	-1	-1	1	1	-1	-1	584,57	0,69
14	10	0,95	0,05	0,95	0,95	500	200	1	-1	1	1	-1	-1	597,82	0,74
15	10	0,05	0,95	0,95	0,95	500	200	-1	1	1	1	-1	-1	612,83	0,79
16	10	0,95	0,95	0,95	0,95	500	200	1	1	1	1	-1	-1	623,16	0,83
17	10	0,05	0,05	0,05	0,05	2500	200	-1	-1	-1	-1	1	-1	617,63	0,83
18	10	0,95	0,05	0,05	0,05	2500	200	1	-1	-1	-1	1	-1	667,09	0,70
19	10	0,05	0,95	0,05	0,05	2500	200	-1	1	-1	-1	1	-1	634,86	0,76
20	10	0,95	0,95	0,05	0,05	2500	200	1	1	-1	-1	1	-1	649,79	0,79
21	10	0,05	0,05	0,95	0,05	2500	200	-1	-1	1	-1	1	-1	633,47	0,85
22	10	0,95	0,05	0,95	0,05	2500	200	1	-1	1	-1	1	-1	657,29	0,82
23	10	0,05	0,95	0,95	0,05	2500	200	-1	1	1	-1	1	-1	636,62	0,85
24	10	0,95	0,95	0,95	0,05	2500	200	1	1	1	-1	1	-1	646,82	0,83
25	10	0,05	0,05	0,05	0,95	2500	200	-1	-1	-1	1	1	-1	563,26	0,43
26	10	0,95	0,05	0,05	0,95	2500	200	1	-1	-1	1	1	-1	588,52	0,64
27	10	0,05	0,95	0,05	0,95	2500	200	-1	1	-1	1	1	-1	605,11	0,73
28	10	0,95	0,95	0,05	0,95	2500	200	1	1	-1	1	1	-1	614,95	0,76
29	10	0,05	0,05	0,95	0,95	2500	200	-1	-1	1	1	1	-1	583,95	0,68
30	10	0,95	0,05	0,95	0,95	2500	200	1	-1	1	1	1	-1	597,96	0,76
31	10	0,05	0,95	0,95	0,95	2500	200	-1	1	1	1	1	-1	610,20	0,79
32	10	0,95	0,95	0,95	0,95	2500	200	1	1	1	1	1	-1	617,63	0,83
33	10	0,05	0,05	0,05	0,05	500	1500	-1	-1	-1	-1	-1	1	624,03	0,82
34	10	0,95	0,05	0,05	0,05	500	1500	1	-1	-1	-1	-1	1	669,76	0,66
35	10	0,05	0,95	0,05	0,05	500	1500	-1	1	-1	-1	-1	1	640,61	0,75
36	10	0,95	0,95	0,05	0,05	500	1500	1	1	-1	-1	-1	1	650,97	0,79
37	10	0,05	0,05	0,95	0,05	500	1500	-1	-1	1	-1	-1	1	632,33	0,85
38	10	0,95	0,05	0,95	0,05	500	1500	1	-1	1	-1	-1	1	658,98	0,82
39	10	0,05	0,95	0,95	0,05	500	1500	-1	1	1	-1	-1	1	639,62	0,84
40	10	0,95	0,95	0,95	0,05	500	1500	1	1	1	-1	-1	1	650,74	0,84
41	10	0,05	0,05	0,05	0,95	500	1500	-1	-1	-1	1	-1	1	564,63	0,42
42	10	0,95	0,05	0,05	0,95	500	1500	1	-1	-1	1	-1	1	582,66	0,60
43	10	0,05	0,95	0,05	0,95	500	1500	-1	1	-1	1	-1	1	604,44	0,73
44	10	0,95	0,95	0,05	0,95	500	1500	1	1	-1	-1	-1	1	622,05	0,78
45	10	0,05	0,05	0,95	0,95	500	1500	-1	-1	1	1	-1	1	585,16	0,69
46	10	0,95	0,05	0,95	0,95	500	1500	1	-1	1	1	-1	1	599,54	0,74
47	10	0,05	0,95	0,95	0,95	500	1500	-1	1	1	1	-1	1	612,94	0,79
48	10	0,95	0,95	0,95	0,95	500	1500	1	1	1	-1	-1	1	624,03	0,82
49	10	0,05	0,05	0,05	0,05	2500	1500	-1	-1	-1	-1	1	1	619,92	0,83
50	10	0,95	0,05	0,05	0,05	2500	1500	1	-1	-1	-1	1	1	668,90	0,69
51	10	0,05	0,95	0,05	0,05	2500	1500	-1	1	-1	-1	1	1	634,45	0,75
52	10	0,95	0,95	0,05	0,05	2500	1500	1	1	-1	-1	1	1	648,51	0,78
53	10	0,05	0,05	0,95	0,05	2500	1500	-1	-1	1	-1	1	1	633,46	0,84
54	10	0,95	0,05	0,95	0,05	2500	1500	1	-1	1	-1	1	1	657,90	0,82
55	10	0,05	0,95	0,95	0,05	2500	1500	-1	1	1	-1	1	1	637,08	0,85
56	10	0,95	0,95	0,95	0,05	2500	1500	1	1	1	-1	1	1	650,17	0,84
57	10	0,05	0,05	0,05	0,95	2500	1500	-1	-1	-1	1	1	1	564,77	0,43
58	10	0,95	0,05	0,05	0,95	2500	1500	1	-1	-1	1	1	1	588,65	0,64
59	10	0,05	0,95	0,05	0,95	2500	1500	-1	1	-1	-1	1	1	603,67	0,73
60	10	0,95	0,95	0,05	0,95	2500	1500	1	1	-1	1	1	1	618,14	0,77
61	10	0,05	0,05	0,95	0,95	2500	1500	-1	-1	1	1	1	1	583,50	0,68
62	10	0,95	0,05	0,95	0,95	2500	1500	1	-1	1	1	1	1	598,07	0,76
63	10	0,05	0,95	0,95	0,95	2500	1500	-1	1	1	1	1	1	609,38	0,79
64	10	0,95	0,95	0,95	0,95	2500	1500	1	1	1	1	1	1	619,92	0,83

Mittels des vollfaktoriellen Versuchsdesigns ist eine systematische Analyse der Wirkungen der Faktoren und ihrer Wechselwirkungen untereinander möglich. Für die Auswertung der Simulationsmittelwerte (siehe Tabelle 14) wurde ein entsprechendes Vorgehen wie unter 2.3.4 gewählt, in dem ein grundsätzlich lineares Modell für die Haupt- und Faktorwechselwirkungen angenommen wurde. Die folgende Abbildung 61 zeigt die Wirkungen der einzelnen Faktoren.



**Abbildung 61: Einflüsse der Faktoren auf die Fahrstrecke im generischen Modell**

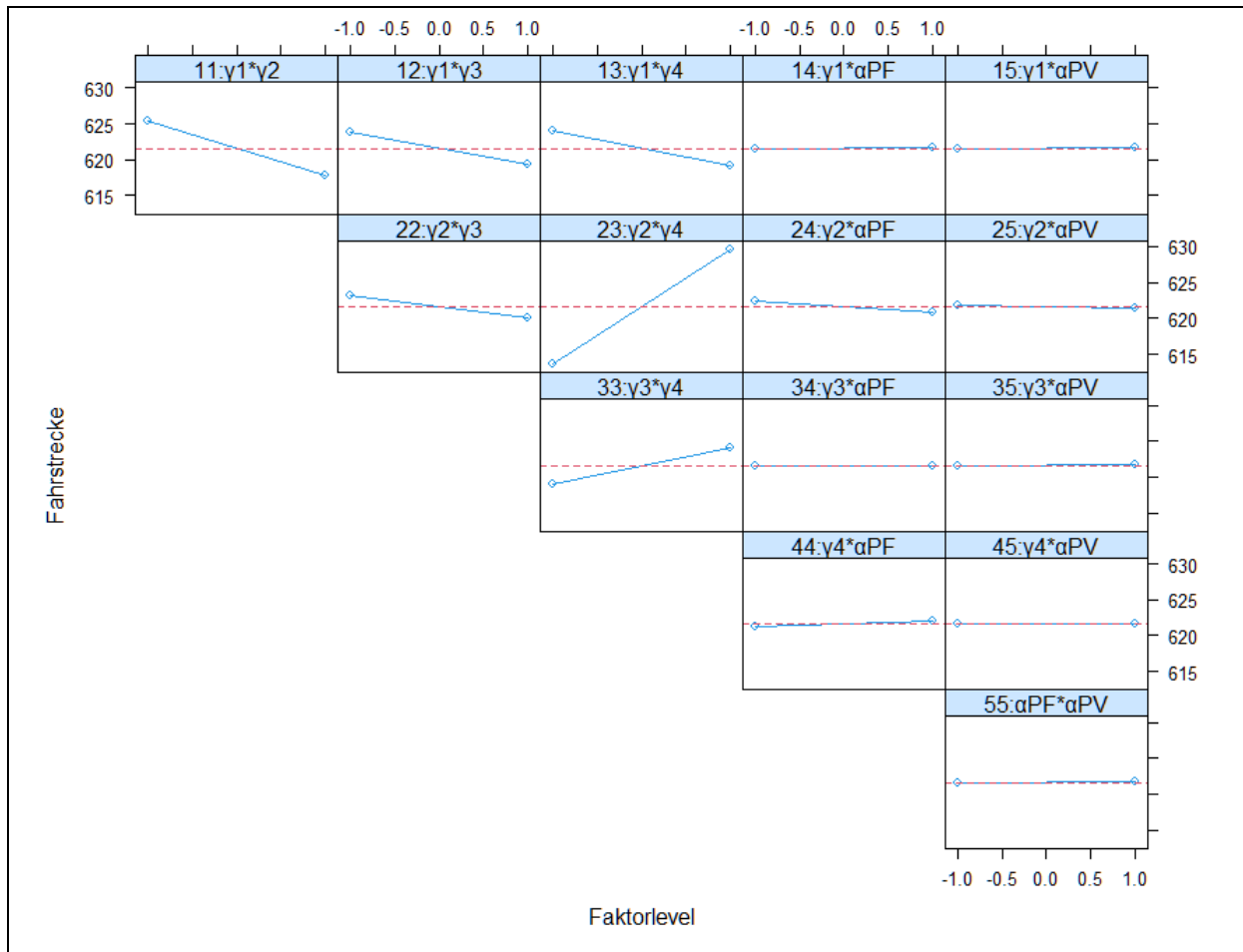
Die Abbildung zeigt deutlich, dass der Parameter  $\gamma_4$  die stärkste Auswirkung hat. Konzeptionsgemäß scheint dieses Ergebnis plausibel, da der Gewichtungsfaktor  $\gamma_4$  den Fahrwegeterm des Pheromonwerts bestimmt. Auch der Faktor  $\gamma_1$  scheint einen großen Einfluss auf die Fahrstrecke zu haben. Allerdings führt ein hoher Wert zu längeren Fahrstrecken und umgekehrt. Ebenso wie  $\gamma_4$  adressiert  $\gamma_1$  einen Term, welcher direkt die Fahrstrecken berücksichtigt. Allerdings setzt dieser erste Term die Fahrstrecke der jeweiligen Fahrzeuggruppe zur Lagerdauer ins Verhältnis. Vermutlich führt eine starke, nahezu ausschließliche Gewichtung dieses Faktors dazu, dass die Fahrzeuge sehr stark nach ihren jeweiligen Klassen segmentiert werden. Die Fahrstrecke wird zugunsten der Segmentierung vernachlässigt. Ohne die weiteren Ergebnisse vorwegzunehmen, bestätigt die Abbildung 62 diese Vermutung. Sie zeigt die Einflüsse der Faktoren auf den Sortiergrad. Wie vermutet, führt eine hohe Ausprägung des Faktors  $\gamma_1$  zu einer höheren Segmentierung der Klassen (höherer Sortiergrad). Hinsichtlich des Einflusses der Evaporationskonstante auf die Fahrstrecke zeigt die Abbildung 61, dass  $\alpha_{PV}$  einen Einfluss hat, dieser allerdings im Vergleich zu den Gewichtungsfaktoren geringer zu sein scheint.



**Abbildung 62: Einflüsse der Faktoren auf den Sortiergrad im generischen Modell**

Die Evaporationskonstante  $\alpha_{PV}$  für die Verkehrsmittelzuordnung hingegen scheint als Faktor keinen nennenswerten Effekt im Vergleich zu den anderen Faktoren auf die Fahrstrecke zu haben. Im Vergleich dazu hat interessanterweise der Faktor  $\gamma_2$  eine hohe Auswirkung auf die Fahrstrecke. Dieser Faktor gewichtet den Term für die Ankunftsreihenfolge und soll vermeiden, dass ältere und neuere Fahrzeuge in den Lagerbereichen gemischt werden. Daher war zu vermuten, dass dieser Faktor vornehmlich auf den Sortiergrad wirkt. Allerdings scheint eine niedrige Ausprägung eine stärkere Durchmischung und somit die Realisierung von kürzeren Fahrwegen zu begünstigen. Das dieser Faktor auch, wie konzeptionsgemäß gewünscht, die Fahrzeugsortierung beeinflusst, wird bei der Betrachtung von Abbildung 62 deutlich. Eine hohe Ausprägung führt zu hohen Sortiergraden und umgekehrt. Erwartungsgemäß zeigt die Abbildung 62 ebenfalls einen sehr starken Einfluss des Gewichtungsfaktors  $\gamma_3$  auf den Sortiergrad. Die Abbildung zeigt deutlich, dass der Einfluss des Faktors  $\gamma_3$  hinsichtlich des Sortiergrads am höchsten ist. Erstaunlicherweise hat auch der Faktor  $\gamma_4$  einen starken Einfluss auf den Sortiergrad. Bei geringer Ausprägung des Faktors  $\gamma_4$  konnten hohe Sortiergrade erzielt werden. Durch eine niedrige Gewichtung der Fahrstrecken durch  $\gamma_4$ , werden stärker segmentierte Aufstellungen anscheinend bei der Pheromonbewertung weniger nachteilig eingestuft. So werden in dieser Konstellation Sortiergrade auf Kosten der Fahrstrecke erhöht. Der Einfluss der Evaporationskonstanten  $\alpha_{PF}$  und  $\alpha_{PV}$  auf den Sortiergrad ist hingegen erwartungsgemäß gering. Wie bereits beschrieben, wirken diese Faktoren nicht auf die Terme, welche die Sortierung beeinflussen.

Neben den Haupteffekten sind auch bezüglich der Kombination von Faktoren relevante Effekte sowohl für die Fahrstecken als auch für den Sortiergrad erkennbar. Diese Faktorwechselwirkungen werden in Abbildung 63 und Abbildung 64 dargestellt.



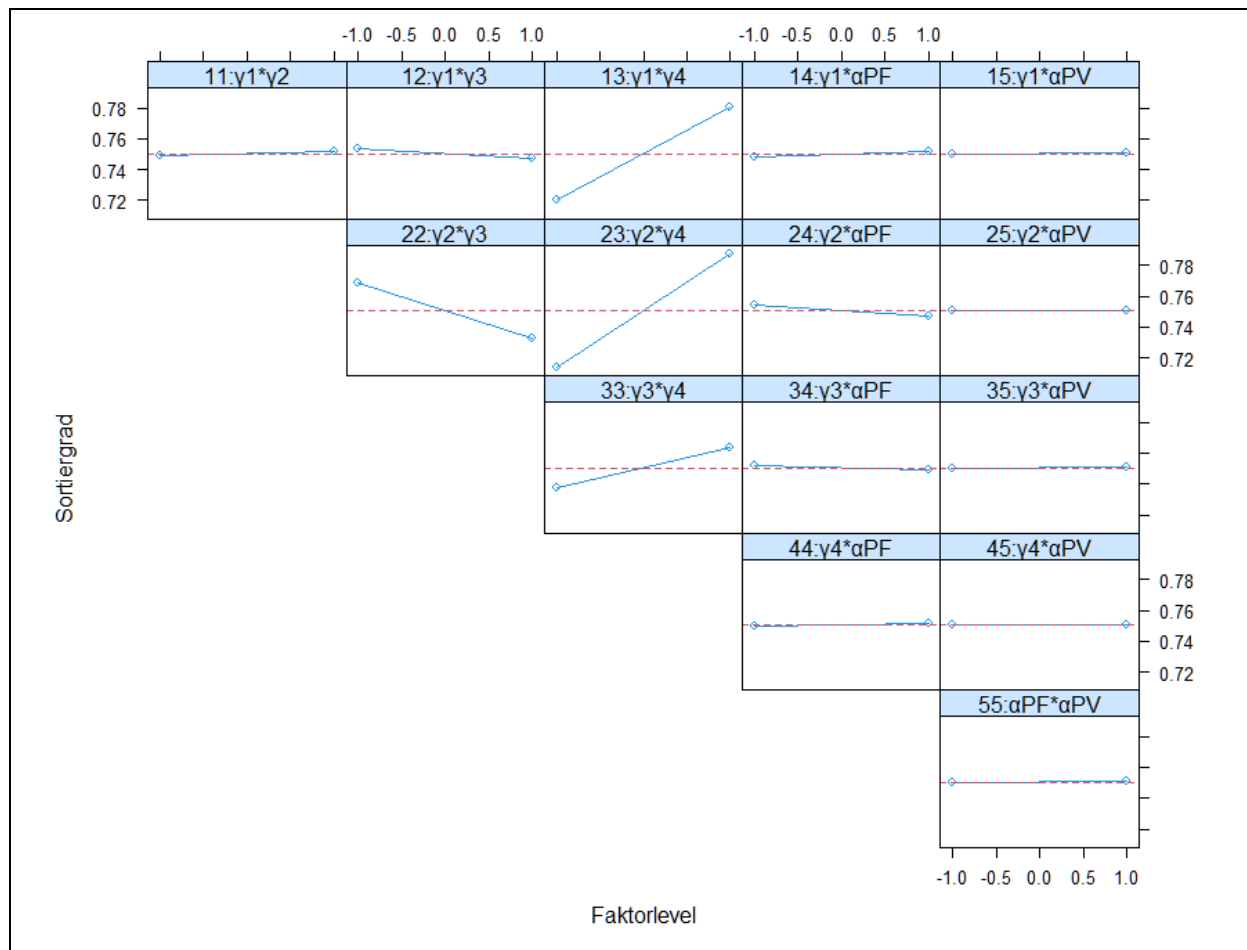
**Abbildung 63: Zweidimensionale Wechselwirkungen (Fahrstrecke) - generisches Modell**

Die Abbildungen zeigen die Mittelwerte der Simulationsergebnisse mit Beteiligung der jeweiligen Faktorkombinationen. Hierbei werden die Faktorwirkungen systematisch spalten- und zeilenweise in Diagrammen aufgetragen. Diese gängige Art der Darstellung hilft Wechselwirkungen zwischen diesen Faktoren (Wechselwirkungen zweiter Ordnung) anschaulich zu visualisieren. Hinsichtlich der Fahrstrecken bestätigt die Abbildung 65, dass vornehmlich Faktorkombinationen mit Beteiligung von  $y_1$  und  $y_4$  die Fahrstreckenergebnisse maßgeblich beeinflussen. Hierbei wird insbesondere die Erwartung bestätigt, dass Kombinationen mit  $y_4$  den größten Einfluss haben.

Ebenfalls wird durch die Betrachtung deutlich, dass Faktorkombinationen mit den Evaporationskonstanten scheinbar einen geringen Einfluss auf die Fahrstrecke haben. Die Abbildung 64 zeigt analog die Einflüsse der Faktorkombinationen auf den Sortiergrad. Auf den ersten Blick wird deutlich, dass vor allem Kombinationen mit den Faktoren  $y_2$  und  $y_3$  einen

starken Einfluss auf den Sortiergrad haben. Dies entspricht dem konzeptgemäßen Wunsch, die Sortierung durch Term 3 und Term 4 im Pheromonwert entsprechend zu berücksichtigen. Die Kombinationen der Faktoren mit den Evaporationskonstanten führt hingegen erwartungsgemäß zu wenig relevanten Effekten.

Bei näherer Betrachtung der Abbildung 64 fällt auf, dass interessanterweise die Kombinationen von  $\gamma_1$  und  $\gamma_4$  den Sortiergrad maßgeblich beeinflussen können.



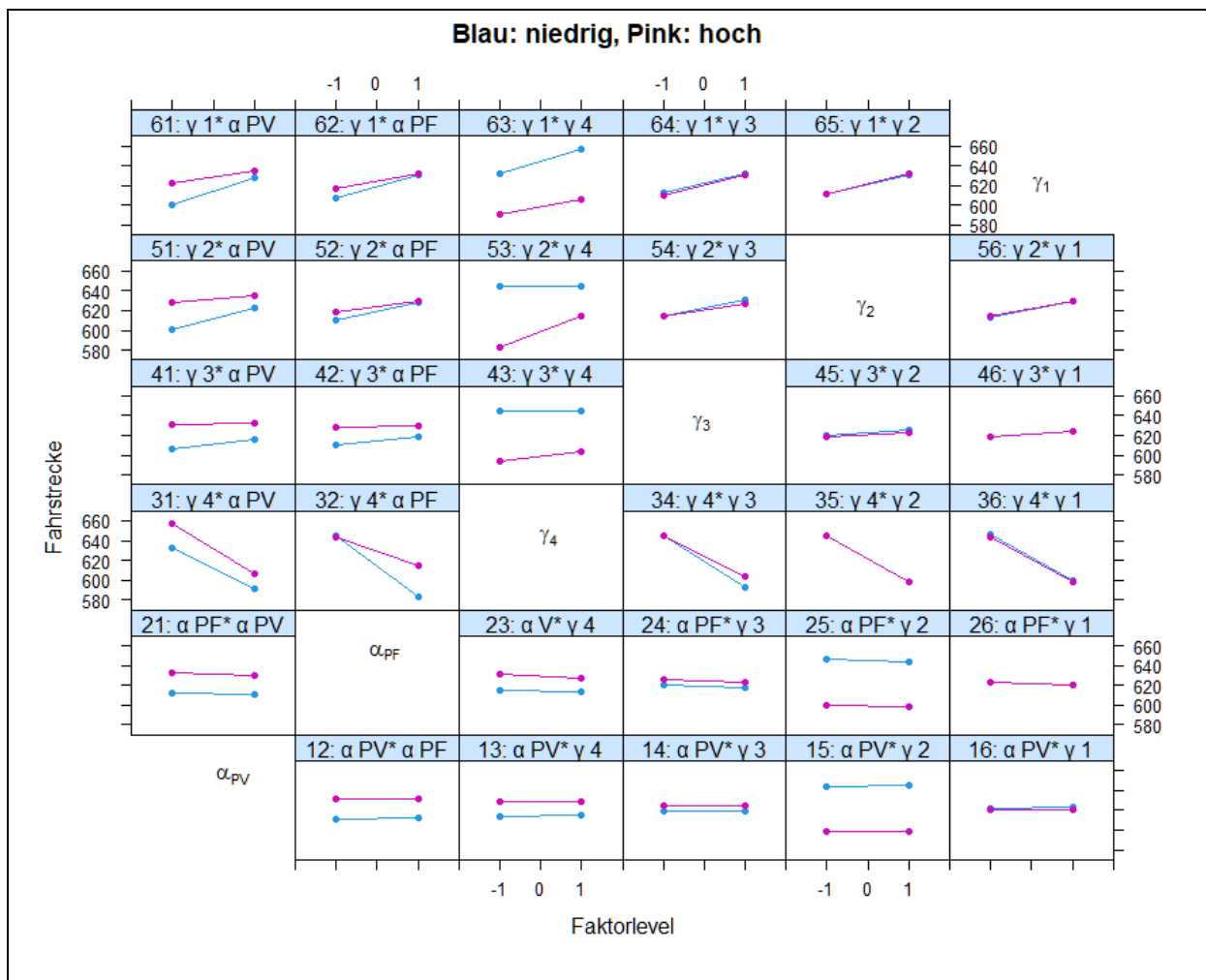
**Abbildung 64: Zweidimensionale Wechselwirkungen (Sortiergrad) - generisches Modell**

Dieser Effekt ist zunächst schwer zu erklären, da weder  $\gamma_1$  noch  $\gamma_4$  direkten Bezug zu dem Sortiergrad haben. Folglich scheint ein impliziter Einfluss beider Faktoren auf den Sortiergrad zu bestehen. Eine vollständige Betrachtung der direkten Faktorkombinationen eröffnete einen genaueren Blick auf diesen Sachverhalt.

Hierfür zeigen die Diagramme in Abbildung 65 und Abbildung 66 alle direkten Kombinationseffekte der Faktoren auf die Fahrstrecken und den Sortiergrad. Die Abbildungen bestätigen, dass der Faktor  $\gamma_4$  auch in Kombination mit den anderen Faktoren die Fahrstreckenergebnisse klar beeinflusst. Die Diagramme für  $\gamma_4$  zeigen, dass ein hoher Wert



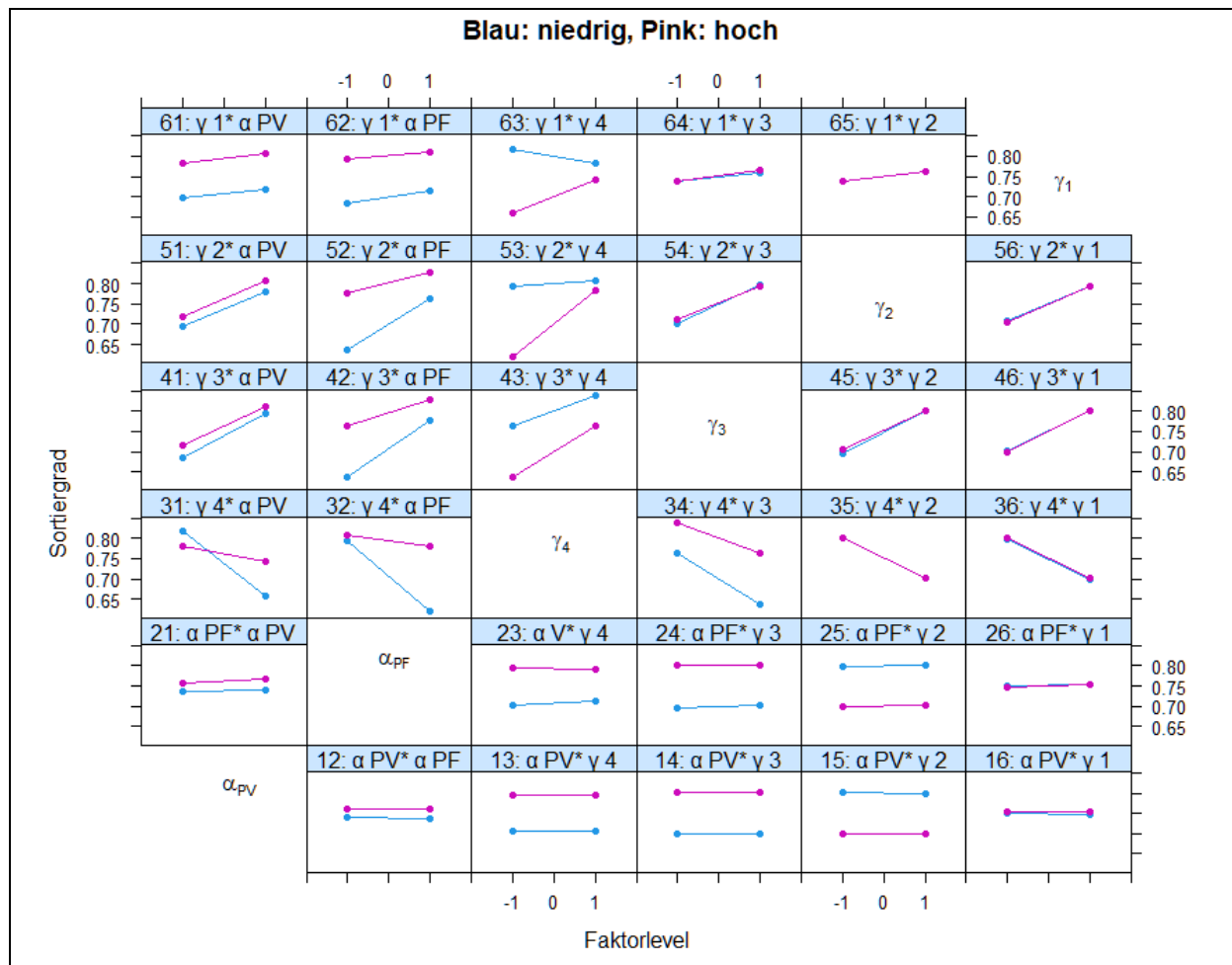
zu geringen Fahrwegen führt. Bei der Betrachtung von Abbildung 65 fällt ebenfalls die Kombination der Faktoren  $\gamma_1$  und  $\gamma_4$  ins Auge. Wie schon bei der Betrachtung der Hauptfaktoren vermutet, wirken diese beiden Faktoren gegenläufig (siehe Subplot 63 in Abbildung 65 und Abbildung 66). So führt eine Kombination von beiden auf hohem Faktorlevel zu vergleichsweise langen Fahrwegen. Der bereits erkannte indirekte Effekt bestätigt, dass hierdurch der Sortiergrad begünstigt werden kann.



**Abbildung 65: Faktorkombinationen und Fahrstrecken**

Ein niedriger Wert von  $\gamma_1$  begünstigt kurze Fahrwege, während ein hoher Wert zu hohen Sortierergebnissen führt. Scheinbar ermöglicht ein niedriger Wert von  $\gamma_1$  in Kombination mit einem hohen Wert von  $\gamma_4$  eine Zuordnung zu kurzen Fahrstrecken. Durch diese starke Fahrwegorientierung werden schlechtere Sortiergrade in der Pheromonbewertung nur marginal berücksichtigt. Umgekehrt zeigen die Abbildungen, dass bei hoher Ausprägung von  $\gamma_1$  anscheinend eine implizite Sortierung der Fahrzeuge nach ihrer Standzeit und den Fahrstrecken der jeweiligen Gruppen (vgl. Term1) begünstigt wird. In diesem Fall wird bei dieser Kombination die Fahrstrecke nahezu nicht berücksichtigt. Folglich resultiert hieraus ein

hoher Sortiergrad bei der Realisierung längerer Fahrstrecken. Hinsichtlich der Evaporationskonstanten bestätigen auch die Abbildung 65 und Abbildung 66 die Beobachtung, dass diese in Kombination mit den übrigen Faktoren einen geringeren Einfluss auf sowohl den Sortiergrad als auch die Fahrstrecke haben.



**Abbildung 66: Faktorkombinationen und Sortiergrad**

Insgesamt kann hinsichtlich der Faktorwirkungen festgehalten werden, dass die beobachteten Haupt- und Nebeneffekte in dem generischen Modell in großen Teilen den konzeptionellen Erwartungen entsprechen. Das Verhalten der kombinierten Selbststeuerung für die Flächen und die Verkehrsmittelzuordnung kann durch die verfügbaren Faktoren grundsätzlich wie geplant beeinflusst werden. Die Faktoren können dazu genutzt werden, das Systemverhalten entsprechend eines gewünschten Zielsystems einzustellen.

### 6.1.9 Zusammenfassung zum generischen Terminalmodell

Anhand eines generischen Terminalmodells wurde die neue integrierte Steuerungsmethode systematisch untersucht. Die Evaluationshypothesen H1-H3 konnten anhand des generischen

---

Modells bestätigt werden. Zunächst wurde die logistische Leistungsfähigkeit der pheromonbasierten Flächenzuordnungsmethode in einem zunehmend dynamischen Umfeld analysiert. Hierbei zeigten die Ergebnisse, dass die neue Methode sowohl bei einer steigenden externen Dynamik durch die Variation der Einlastungsfunktion als auch bei zunehmend veränderter Abgangsdynamik zu einer verbesserten und stabilen logistischen Leistungsfähigkeit führt. Die weitere Analyse der Leistungsfähigkeit der Methode bei zunehmender struktureller Komplexität zeigte, dass die pheromonbasierte Lagerzuordnung insbesondere in zunehmend komplexen Szenarien zu besseren Ergebnissen führt. In einem letzten Analyseschritt wurde der neue integrierte Ansatz untersucht. Auch hier zeigte die Analyse, dass eine Steigerung der Logistikleistung gegenüber konventionellen Ansätzen möglich ist. Auf dieser Grundlage wurde eine systematische Parameteranalyse mittels eines vollfaktoriellen Versuchsplans vorgenommen. Die Analyse zeigte deutlich, dass die konzipierten Gewichtungsfaktoren der pheromonbasierten Methode die Zielerreichung in gewünschter Weise beeinflussen.

## **6.2 Analyse des realdatenbasierten Terminalmodells**

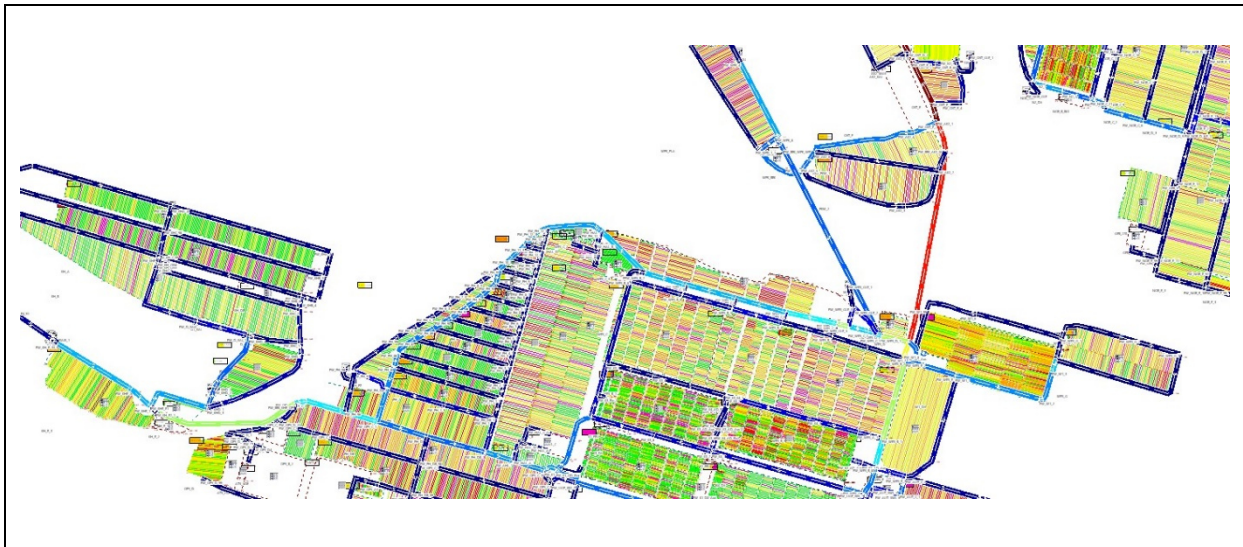
Die Basishypothesen H1-H3 konnten im Zuge der Hauptstudie bestätigt werden. Folglich sollen in der zweiten Phase der Hauptstudie die weiterführenden Hypothesen H4 und H5 untersucht werden. Somit steht der Aspekt der Übertragbarkeit des Ansatzes und der am generischen Modell gewonnenen Erkenntnisse auf reale Terminalsysteme im Vordergrund der Betrachtung. Zu diesem Zweck wurde ein Simulationsmodell des in Kapitel 3 beschriebenen Terminals entwickelt, implementiert und für die Evaluation herangezogen. Zunächst wird das Modell beschrieben und mit dem generischen Modell verglichen. Anschließend wird auf die Implementierung der Selbststeuerungsmethode eingegangen. Weiterhin werden die Benchmarkmethoden für den Vergleich der Leistungsfähigkeit beschrieben und diskutiert.

### **6.2.1 Simulationsmodell des realen Terminalbeispiels**

Das genutzte Simulationsmodell verwendet strukturell dieselben Funktionselemente wie das generische Modell (siehe auch Kapitel 6.1) und wurde ebenfalls mittels der ereignisdiskreten Simulationssoftware Plant Simulation (Version 16) umgesetzt. Es umfasst alle Lagerflächen und Lagerreihen sowie alle Ein- und Ausgangspunkte des realen Terminals. Die räumliche Anordnung der Lagerflächen und Reihen entspricht hierbei maßstäblich dem realen System. Die Abbildung 67 zeigt diese maßstäbliche Umsetzung mit Fahrwegen, Lagerflächen und Lagerreihen. Wie im generischen Modell sind alle Lagerflächen durch Fahrwege miteinander verbunden. Hierbei wurden alle örtlichen Gegebenheiten der Fahrwege maßstäblich nachmodelliert. Hierzu zählt neben der Topologie auch die jeweilige Fahrwegrichtung (u.a. Berücksichtigung von Einbahnstraßen). Die Eingangs- und Ausgangspunkte wurden, wie in

---

dem generischen Modell, in punktueller Ausdehnung (diskret) modelliert. An diesen Punkten können die Verkehrsmittel (Lkw, Schiffe und Züge) entsprechend der jeweiligen Verfügbarkeit entladen werden.



**Abbildung 67: Ereignisdiskretes Simulationsmodell des realen Terminals**

Anders als in dem generischen Modell werden die ankommenden und abgehenden Fahrzeuge anhand der verfügbaren Realdaten aus dem Jahr 2020 modelliert. Die in den vorliegenden Daten beschriebenen Ankunft- und Abgangsprozesse (Zeitpunkt, Ort, Verkehrsträger) und werden in dem Modell verwendet. Weiterhin umfassen diese Daten alle Fahrzeugbewegungen auf dem Terminal (u.a. Fahrten vom Ein- oder Ausgangspunkt zum Lagerort, Fahrten zwischen Lagerorten, Fahrten zwischen Lagerorten und Technik). Die Daten sind hierbei als Historie aufgebaut. Jede Zeile der Bewegungshistorie beschreibt eine Fahrtbewegung eines Fahrzeugs. Neben den Bewegungsdaten liegen alle relevanten statischen Daten zu den Fahrzeugen (u.a. Hersteller, Modell, Destination, Eingangstransportmittel, Ausgangstransportmittel), welche im Rahmen einer klassischen Flächen- und Liegeplatzzuordnung benötigt werden, vor. Insgesamt umfasst der Datensatz ca. 1,8 mio. Fahrzeuge aus dem Jahr 2020 und die dazugehörigen Fahrbewegungen. In den Daten können für den Export 5367 HMD-Kombinationen und für den Import 1706 HMD-Kombinationen gefunden werden. Folglich umfassen die Daten 7073 HMD-Kombinationen, welche im Rahmen der Lagerplatzzuordnung berücksichtigt werden müssen. In dem betrachteten Zeitraum wurden 1245 Schiffe an den Kajen des Terminals abgefertigt. Die abgehenden Schiffe können in insgesamt 37 verschiedene Reisekategorien unterschieden werden. Jede Reisekategorie steuert einen unterschiedlichen Satz an Zieldestinationen an. Die folgende Tabelle 15 vergleicht das in 6.1.7 verwendete generische Terminalmodell mit dem realdatenbasierten Modell zusammenfassend.

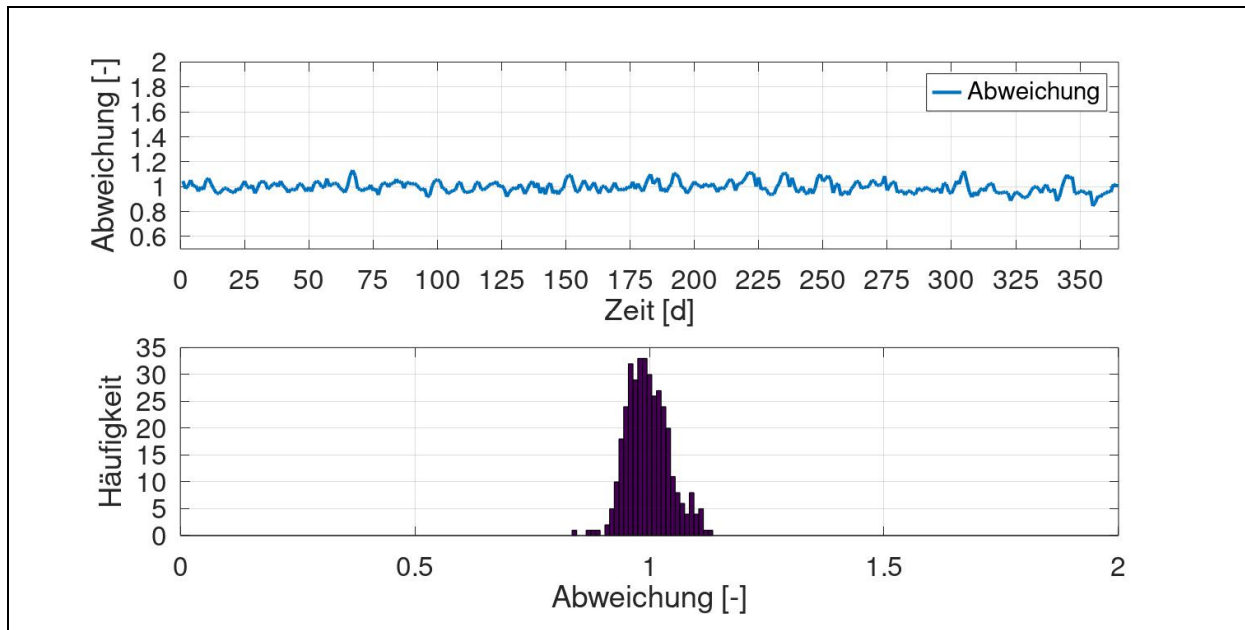
---

**Tabelle 15: Vergleich generisches Modell mit Terminalmodell**

	Generisches Modell (6x6)	Terminalmodell
Jahres Volumen	456.202	1.765.787
Anzahl Reihen	1.692	18.825
Terminalkapazität	21.996	104.478
Anzahl Schiffe	447	1.245
Fahrzeuggruppen	36	7.073
Anzahl Liegeplätze	5	11
Anzahl sonst. Quellen und Senken (Lkw/Bahn)	5	18
HMD-Kombination	36	7073
Schiffsreisekategorien	3	37

Die Tabelle 15 zeigt, dass die Modelle aus Sicht der strukturellen Eigenschaften grundsätzlich funktionell vergleichbar sind. Allerdings weist das Modell des realen Terminals in allen Ausprägungen eine höhere Komplexität auf. Insbesondere aus der deutlich höheren Anzahl von HMD-Kombinationen und Schiffsreisekategorien ergeben sich mehr Kombinationsmöglichkeiten, welche als besondere Herausforderung gesehen werden können.

Um die korrekte Abbildung des realen Terminalsystems in dem Simulationsmodell sicherzustellen, wurden verschiedene Verifikations- und Validierungsschritte vorgenommen (vgl. Tabelle 2). Wie durch Eley beschrieben, wurde zunächst eine Schreibtischvalidierung durchgeführt (Eley, 2012). Im Zuge dieser Arbeiten wurden alle Funktions- und Codeelemente des Modells gründlich auf Vollständigkeit und Konsistenz geprüft. Auch wurden im Rahmen der Verifikation an einer Stichprobe von Fahrzeugobjekten Trace-Analysen durchgeführt und das korrekte Verhalten des Modells schrittweise untersucht. Für die Validierung wurden ein Monitoring-Ansatz mit einem Ergebnisvaliditätstest kombiniert durchgeführt. Die folgende Abbildung 68 zeigt die Input-Output-Analyse für einen Referenzsimulationslauf im Vergleich mit realen Daten aus den Reports des realen Lagerverwaltungssystems. In dem Simulationslauf wurden die Fahrzeuge gemäß ihrer Historie über die Terminalflächen bewegt. Der erste Plot in der Abbildung 68 zeigt das Verhältnis des Bestands laut des Terminalsystems zu dem Bestand in der Simulation. Je näher dieses Verhältnis bei dem Wert 1.0 liegt, desto geringer ist die Abweichung. Es ist zu erkennen, dass die Werte lediglich geringfügig voneinander abweichen. Dies wird bei Betrachtung des zweiten Plots deutlicher. Er weist diese Abweichung in Form eines Histogramms aus. Deutlich ist zu erkennen, dass die beobachteten Werte um 1.0 verteilt sind.



**Abbildung 68: Input-Output-Validierung Terminalmodell**

Die aufgetretenen Abweichungen können durch zwei Effekte erklärt werden. Zum einen durch leichte Abweichungen bei der Datenaufbereitung für das Modell (u.a. Entfernen von unvollständigen Datensätzen). Zum anderen können auch durch die Aufnahmezeitpunkte des Reports im WMS-System des Terminals Unterschiede entstehen. Die zeitliche Rasterung ist in den Reports auf Tagesbasis. Für den Bestand wird ein Durchschnittswert herangezogen. Dieser Durchschnittswert kann unterschiedlich stark von den beobachteten Beständen in dem ereignisdiskreten Modell abweichen und somit zusätzlich zu den beobachteten Differenzen beitragen. Aufgrund der geringen Abweichungen wird das Modell als valide für die weiteren Analysen angesehen. Die durchschnittliche Abweichung über alle Tage beträgt 0,35 %.

### 6.2.2 Implementierung von Selbststeuerungs- und Benchmarkmethoden

Ziel der Hauptstudie ist die Verifizierung oder Falsifizierung der Analysehypthesen H4-H5 anhand des realdatenbasierten Terminalmodells. Um die Übertragbarkeit und die Vergleichbarkeit mit dem generischen Modell sicherzustellen, werden sowohl die pheromonbasierte Flächenzuordnung als auch die selbststeuernde Verkehrsmittelzuordnung in dem Modell integriert. Aufgrund der identischen strukturellen Eigenschaften (u.a. reihenbasierte Lagerung auf den Flächen, einheitliche Ein- und Ausgangspunkte für Schiffe, Bahn und Lkw) können beide Selbststeuerungsmethoden in exakt gleicher Weise implementiert werden. Die pheromonbasierte Lagerzuordnung differenziert die Fahrzeuge gemäß der bekannten HMD-Kombinationen (7073 verschiedene Kombinationen). Für die pheromonbasierte Verkehrsmittelzuweisung wird aus Gründen der leichteren Vergleichbarkeit mit dem generischen Modell lediglich auf Exportschiffe fokussiert. Hierbei werden insgesamt

---

37 Schiffsreisekategorien unterschieden. In allen Fällen werden die aus den Daten bekannten Liegezeiten verwendet. Wie auch schon in dem generischen Modell kann jede Kaje nur ein Schiff zurzeit bearbeiten (diskrete Liegeplätze). Für die Analyse werden die Fahrzeuge und Verkehrsmittel anhand der vorliegenden historischen Daten zu den bekannten Zeitpunkten erzeugt. Die Liegezeit wurde entsprechend aus den historischen Daten übernommen. Neben den Verkehrsmittelinformationen umfassen die historischen Daten die Bewegungszeitpunkte und die jeweiligen Lagerplatzzuordnungen für die Fahrzeuge. Folglich umfassen die historischen Daten zusätzlich zu den unter 3.2 beschriebenen Eingangs-, Lagerungs- und Ausgangsbewegungen weitere Einträge. Beispielsweise für die Zu- und Rückführung zu Technikprozessen oder für lagerinterne Defragmentierungsbewegungen. Um die Leistungsfähigkeit des neuen Ansatzes untersuchen zu können, werden daher verschiedene Benchmarkmethoden verwendet.

Die Basis der Evaluation stellen die Simulationsergebnisse der historischen Daten (im weiteren als HD bezeichnet) dar. Für diese Evaluationsgröße vollziehen die Fahrzeuge exakt alle in der Historie dokumentierten Fahrbewegungen durch das Modell. Auch alle Verkehrsmittel erreichen und verlassen das Terminal, wie durch die historischen Daten beschrieben. Während eines Simulationslaufs werden, wie bei dem generischen Modell, alle Fahrstrecken und die jeweiligen Sortiergrade aufgenommen. Die Ermittlung dieser Zielgrößen erfolgt im Modell analog zu der Evaluation in 6.1 gemäß der Definition aus 4.2. Um die Vergleichbarkeit mit den Ergebnissen der vorangegangenen Analysen zu ermöglichen, werden die entwickelten selbststeuernden Prozesse der pheromonbasierten Steuerung für die Basisprozesse (Wareneingang, Lagerung und Warenausgang) fokussiert. Für eine gute Verständlichkeit berücksichtigt die Analyse daher keine weiteren Bewegungen der Fahrzeuge (z.B. Lagerdefragmentierung oder Umsortierung) für die selbststeuernden Prozesse. Somit ist ein direkter Vergleich der neuen Methoden mit den reinen historischen Daten (HD) nur bedingt aussagefähig, da die Ergebnisse auf einer unterschiedlichen Anzahl Fahrbewegungen beruhen. Um einen fairen Vergleich sicherzustellen, wird eine weitere Vergleichsgröße als Benchmark herangezogen. Die Simulationsläufe nutzen für diesen Benchmark ebenfalls die historischen Daten, allerdings führen die Fahrzeuge genau wie die bei der pheromonbasierten Methode nur die Eingangs-, die Lager- und die Ausgangsbewegungen durch. Somit ist die Anzahl Fahrbewegungen für den Benchmark- und den Selbststeuerungsfall identisch. Für die Flächenzuweisung bei diesem Benchmark werden die historischen Zuordnungen verwendet: Für die jeweilige HMD-Kombination werden die in dem Simulationszeitraum genutzten Flächen dieser Fahrzeuggruppe in einer Liste gesammelt und nach ihrer Besuchshäufigkeit sortiert. Nach dieser Reihenfolge werden die Fahrzeuge systematisch den Lagerflächen zugeordnet. Sofern Flächen vollständig belegt sind, werden Flächen mit der nächst geringeren Reihenfolgeposition ausgewählt. Diese zweite Vergleichsgröße stellt einen fairen Vergleich

---

der Methoden sicher. Durch die Reduktion von Fahrbewegungen für diesen Benchmark, welcher im Folgenden konventionelle Flächenzuordnung (KF) genannt wird, werden für den Vergleich immer dieselbe Anzahl Fahrbewegungen zugrunde gelegt. Eine Anwendung der algorithmischen Zuordnung (AF) ist aufgrund der Problemgröße nicht praktikabel umsetzbar.

Als Vergleichsgröße für eine konventionelle Liegeplatzzuordnung werden die bereits in 6.1.7 genutzten Algorithmen (BV und AV) verwendet. Hierbei werden für alle verfügbaren Liegeplätze die Fahrstrecken zu allen einem Schiff zugeordneten Fahrzeugen ermittelt. Die Umsetzung des Algorithmus erfolgt analog zu der Analyse in dem generischen Szenario. Die in Tabelle 13 gewählten Parameter für die rollierende Liegeplatzzuordnung werden auch für diese Evaluation verwendet. Zudem wurden als weitere Anhaltspunkte die zufallsbasierten Methoden (ZF und ZV) analog zu den Implementierungen im generischen Modell verwendet. Wie für die KF und die PF Methode werden für die ZF Methode die bereinigten Bewegungsdaten (Eingang, Lagerung und Ausgang) verwendet.

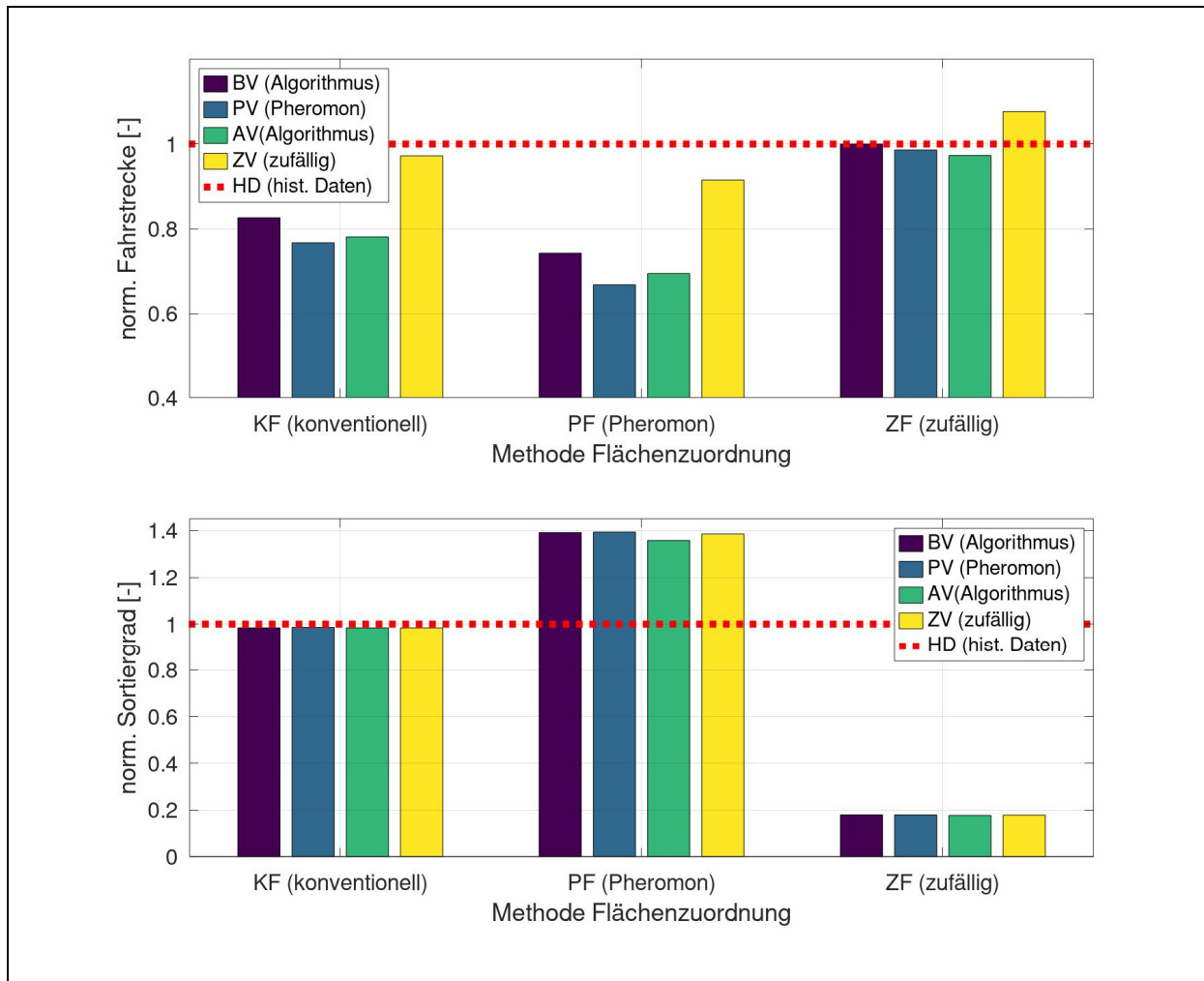
Um die Methoden besser untereinander vergleichen zu können, werden die Simulationsergebnisse auf die Ergebnisse des Basisbenchmarks (HD) normiert. Hierfür wird das Verhältnis zwischen dem für die Simulation erzielten Durchschnittswert und dem Durchschnittswert des HD-Simulationslaufs ermittelt und als Verhältnis auf diesen Durchschnittswert bezogen. Ist das Verhältnis größer als eins, so haben die Methoden zu entsprechend höheren Werten (z.B. besserer Sortiergrad) geführt.

### 6.2.3 Analyse der logistischen Leistungsfähigkeit des integrierten Ansatzes

Für die Evaluation wurde zunächst ein Referenzsimulationslauf mit den historischen Daten (HD) für das Jahr 2020 durchgeführt. Anschließend wurden Simulationsläufe für die entsprechenden Methodenkombinationen durchgeführt. Bei den pheromonbasierten Methoden wurden in verschiedenen Simulationsläufen die Evaporationskonstanten systematisch variiert. Für die Analyse werden die jeweils besten Ergebnisse mit den konventionellen Methoden verglichen. Für die Beurteilung der Leistungsfähigkeit wurden auf der Basis von vorbereitenden Testläufen die folgenden Werte für die Gewichtungsfaktoren gewählt:  $\gamma_1 = 0,3$ ,  $\gamma_2 = 0,15$ ,  $\gamma_3 = 0,15$  und  $\gamma_4 = 0,4$ .

Die Abbildung 69 fasst die Simulationsergebnisse für alle beschriebenen Vergleichsgrößen zusammen. Sie zeigt die erzielten normierten Durchschnittswerte (bezogen auf HD) für alle Methoden. Als zusätzliche Orientierungshilfe wurde in den Diagrammen der normierte Vergleichswert abgebildet (rote gestrichelte Linie).





**Abbildung 69: Simulationsergebnisse für das realdatenbasierte Terminalszenario**

Hinsichtlich der Fahrstrecken liegt der Referenzwert der historischen Daten (HD) erwartungsgemäß über den Durchschnittswerten aller angewendeten Methoden. Die Abbildung 69 zeigt deutlich, dass die pheromonbasierte Flächenzuordnung in allen Fällen zu kürzeren Fahrstrecken führt als die konventionelle Zuordnung (KF). Hierbei ist für die Kombination von PF und PV die kürzeste durchschnittliche Fahrstrecke zu beobachten (66,81 % der Fahrstrecken des HD-Referenzwerts). In der Abbildung 69 ist ebenfalls zu erkennen, dass die Kombination von PF und AV bereits zu geringeren durchschnittlichen Fahrstrecken (69,74 % des HD-Referenzwerts) führt als die Kombinationen der KF-Methode (74,26 % des HD-Referenzwerts). Der Unterschied zwischen den Kombinationen von KF-PV und KF-AV ist allerdings relativ gering. Die Kombination KF und PV führt zu 76,71 % des Referenzwerts. Im Vergleich hierzu führt die Kombination von KF und AV zu schlechteren Ergebnissen hinsichtlich der durchschnittlichen Fahrstrecken (82,62 %). Anders als in den Analysen zum generischen Modell kann ein größerer Unterschied zwischen der BV und der AV Methode erkannt werden. In diesem Szenario führt die AV Methode zu deutlich kürzeren

---

Fahrstrecken. Dies wird besonders bei der ZF-Methode deutlich. Hier führt die AV Methode zu den besten Ergebnissen.

Diese Ergebnisse bestätigen die bereits gewonnenen Erkenntnisse aus der Analyse des generischen Szenarios. Die pheromonbasierten Methoden sind grundsätzlich geeignet, die durchschnittlichen Fahrstrecken im Vergleich zu konventionellen Methoden zu reduzieren. In dem Realszenario scheint der Beitrag der PV-Methode auf die Fahrstrecken stärker ausgeprägt zu sein als in dem generischen Szenario. Dies kann durch die zusätzliche strukturelle Komplexität des realen Szenarios erklärt werden. Das Terminal umfasst im Vergleich zu dem generischen Modell die fünffache Lagerkapazität und ca. 200-mal so viele HMD-Kombinationen. Hieraus resultiert in dem realen Szenario eine deutliche Komplexitätssteigerung. Insbesondere die Kombination von PF und PV Methoden scheint diese zusätzliche Komplexität besser bewältigen zu können.

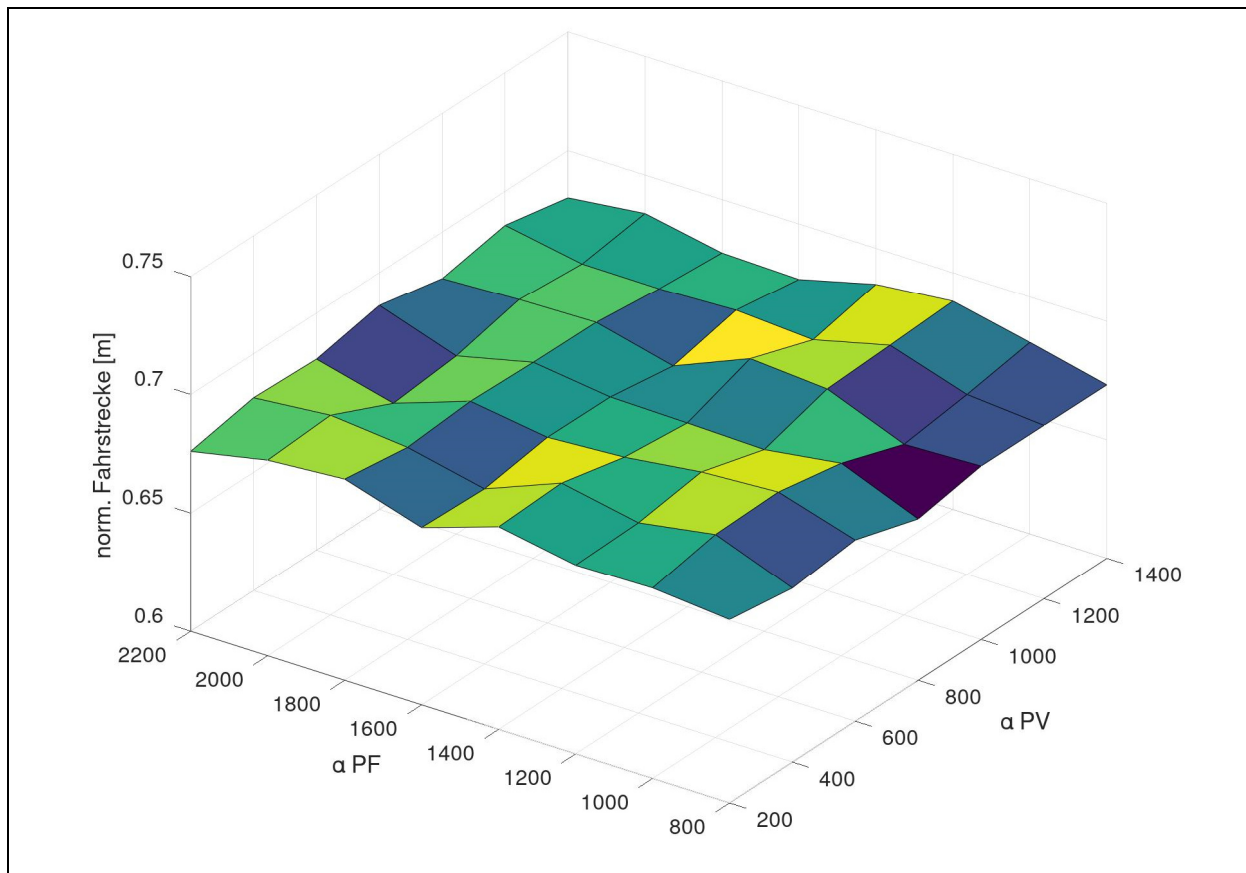
Auch hinsichtlich des Sortiergrads bestätigen die Ergebnisse in Abbildung 69 die bereits am generischen Modell gewonnenen Erkenntnisse. Der Einsatz der PF Methode führt zu einer Verbesserung der Sortierung. Wie schon bei dem generischen Modell beobachtet, ist der Einfluss der Verkehrsmittelzuordnung (PV-Methode und AV-Methode) auf den Sortiergrad eher gering. Durch die explizite Fokussierung der PV-Methode auf die Sortierergebnisse (Term 2 und Term 3 der Gleichung) führt die Methode zu hohen Sortiergraden. Interessanterweise führt dennoch die Kombination von PF-AV zu leicht geringeren Sortiergraden als im Vergleich zu den anderen Kombinationen der PF-Methode.

Im Gegensatz hierzu führt die KF-Zuordnung nahezu zu ähnlichen Sortiergraden wie das Referenzszenario. Dies ist aufgrund der konzeptionellen Gestaltung der KF-Methode wenig überraschend. Wie unter 6.2.2 beschrieben, werden die Flächen, welche für die Zuweisung der KF-Methode genutzt werden, direkt aus den historischen Daten abgeleitet. Die Methode weist jeder HMD-Kombination den Flächen, welche sie laut der historischen Daten am häufigsten belegt haben, zu. Das zeigt, dass die KF-Methode folglich die Zuordnungslogik der historischen Daten gut abbildet. Die Sortiergrade der KF-Methodenkombinationen liegen deutlich unter denen bei den PV-Methoden-Kombinationen. Die schlechtesten Sortiergrade werden erwartungsgemäß bei den Kombinationen der ZF-Methode beobachtet.

Auch für die Untersuchung des realen Szenarios wurde vor der Analyse vermutet, dass die Evaporationsparameter der PF-Methode und der PV-Methode einen relevanten Einfluss auf die Leistungsfähigkeit haben. Zu diesem Zweck zeigt die Abbildung 70 die auf die HD-Referenzwerte bezogenen normierten Fahrstrecken für die PF-Methode und die PV-Methode. Anders als bei dem generischen Szenario kann in der Abbildung 70 keine klare Tendenz für

---

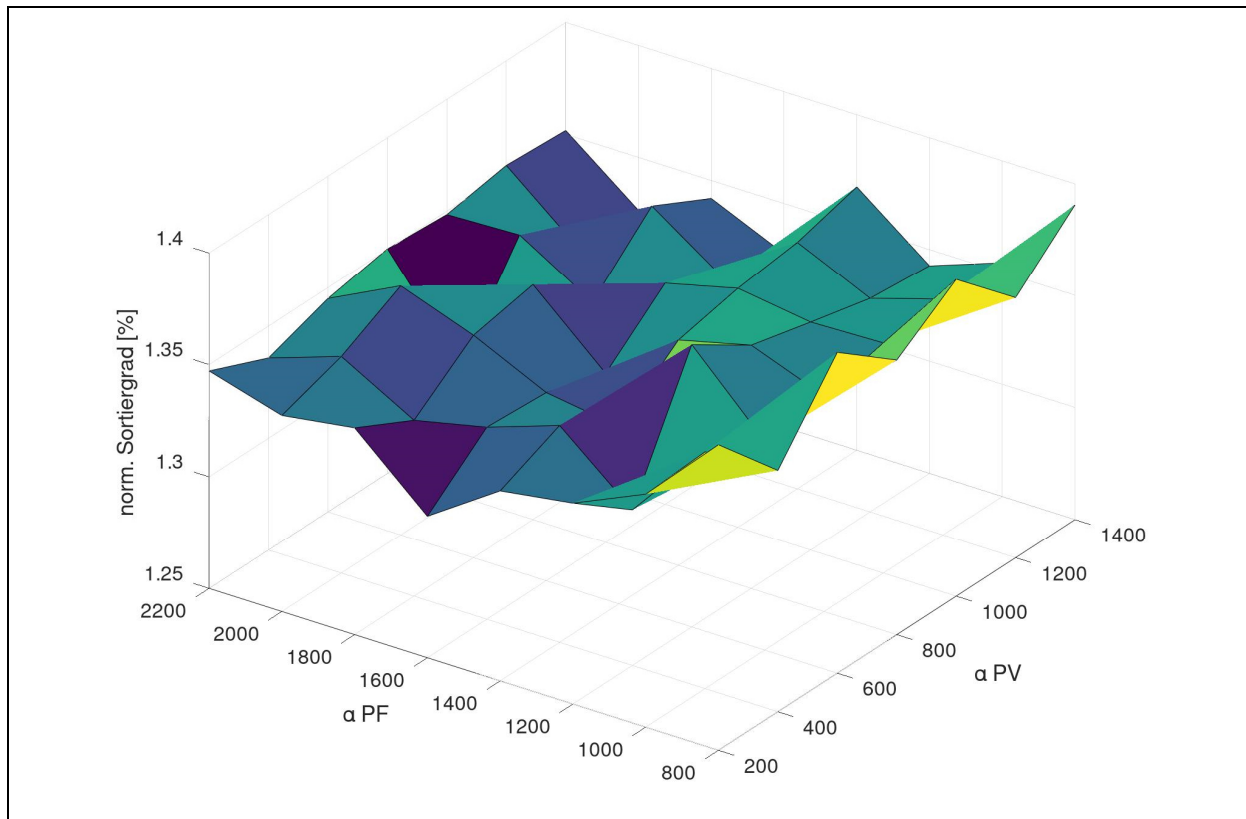
gut geeignete Wertebereiche für die beiden Parameter erkannt werden. Vielmehr führen die einzelnen Ausprägungen zu vergleichbaren Ergebnissen.



**Abbildung 70: Normierte Fahrstrecken bei veränderten Evaporationskonstanten**

Scheinbar sind die realisierten Fahrstrecken gegenüber den Evaporationskonstanten stabil. Hieraus resultiert die Frage, ob die Evaporationskonstanten für den realdatenbasierten Fall grundsätzlich eine nachrangige Bedeutung haben oder ob dieser beobachtete Effekt durch das Zusammenwirken mit den übrigen Parametern (Gewichtungsfaktoren) resultiert. Wie schon für das generische Modell scheint eine vollständige Untersuchung der Wirkungen aller Parameter für diesen realen Fall unabdingbar zu sein.

Die Abbildung 71 bestätigt dies. Sie zeigt die Ergebnisse hinsichtlich des Sortiergrads für die beiden Evaporationsparameter. Interessanterweise scheint insbesondere die Evaporationskonstante für die Lagerflächenzuordnung einen Einfluss auf die beobachteten Sortiergrade zu haben. Offensichtlich werden bessere Sortierergebnisse bei geringeren Werten von  $\alpha_{PF}$  erzielt.



**Abbildung 71: Normierter Sortiergrad bei veränderten Evaporationskonstanten**

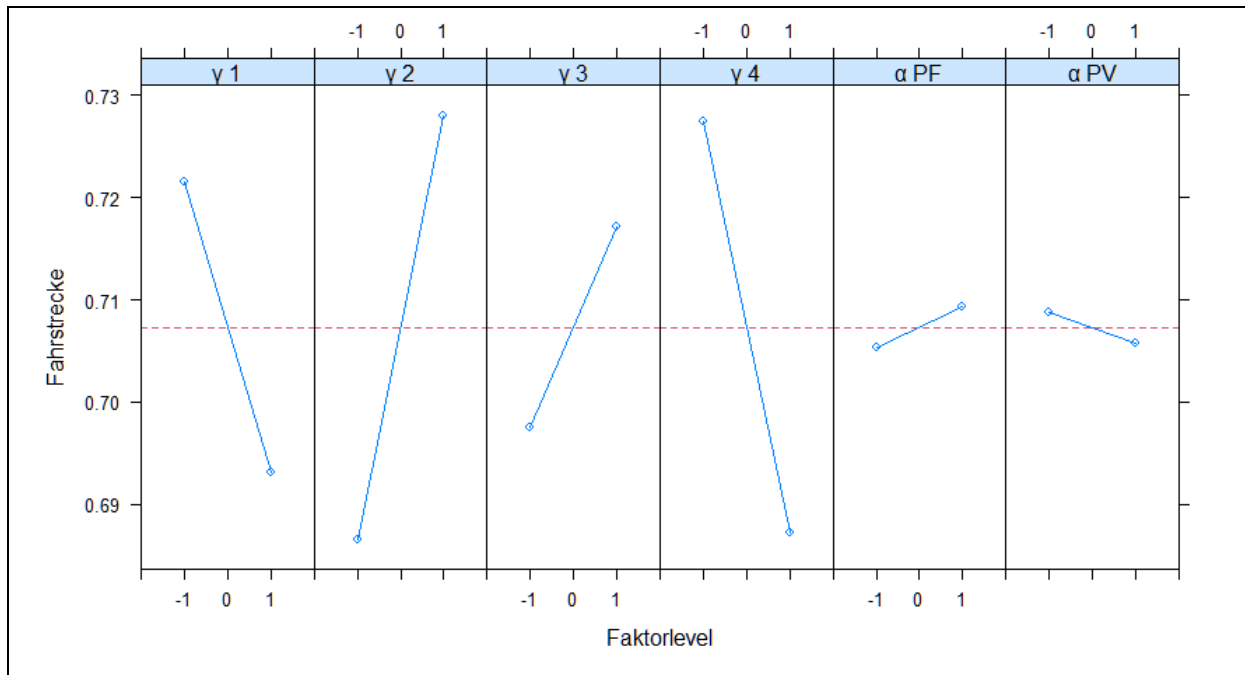
Auch dieses Ergebnis weicht von den Beobachtungen am generischen Modell (vgl. Abbildung 60) ab. Anhand dieser isolierten Beobachtungen zu den Evaporationsparametern kann die grundsätzliche Wirkweise der Parameter nicht umfänglich interpretiert werden. Daher wird, wie schon für das generische Modell, im Folgenden eine detaillierte Parameteranalyse durchgeführt.

#### 6.2.4 Analyse der Wirkung der Methodenparameter

Für die Analyse der Wirkungen aller Parameter auf die Fahrstrecken und die Sortiergrade wurde auch für das realdatenbasierte Modell eine vollfaktorielle Versuchsplanung vorgenommen, simuliert und ausgewertet. Hierbei wurde der in der Tabelle 14 definierte Versuchsplan angewendet und Simulationsergebnisse entsprechend, wie unter 6.1.8 beschrieben, ausgewertet. Allerdings wurden für das realdatenbasierte Szenario erneut die normierten Fahrstrecken und die normierten Sortiergrade für die Analyse herangezogen. Im Übrigen gleicht der Gang der Analyse dem Vorgehen aus Kapitel 6.1.8.

Die folgende Abbildung 72 zeigt die Einflüsse der Hauptfaktoren auf die normierte Fahrstrecke. Wie bereits bei Abbildung 70 vermutet, zeigt die Auswertung der Hauptfaktoren, dass die Evaporationskonstanten  $\alpha_{PF}$  und  $\alpha_{PV}$  lediglich einen geringen Einfluss auf die Fahrstrecke haben. Den größten Ergebniseinfluss hinsichtlich der Fahrstrecke hat, wie schon bei der

Betrachtung des generischen Modells, der Gewichtungsfaktor  $\gamma_4$ . Auch in dem realen Szenario hat eine niedrige Faktorausprägung längere Fahrstrecken zur Folge und umgekehrt. Dies ist ähnlich wie bei den Beobachtungen am generischen Modell zu begründen. Konzeptionell gewichtet dieser Faktor direkt die Bewertung der Fahrstrecken in dem Term 4 der Flächenzuordnung. Folgerichtig führt diese Gewichtung direkt zu Veränderungen der realisierten Fahrstrecken. Auch die Wirkungen der Hauptfaktoren  $\gamma_2$  und  $\gamma_3$  sind qualitativ mit den am generischen Modell gewonnenen Erkenntnissen vergleichbar.



**Abbildung 72: Einfluss der Faktoren auf die normierte Fahrstrecke**

Der Gewichtungsfaktor  $\gamma_2$  bewertet den Term, welcher die Standzeiten und somit die Sortierung nach dem FIFO-Prinzip unterstützt. Bei einer geringeren Gewichtung entscheiden sich Fahrzeuge tendenziell eher für Lagerorte mit kurzen Fahrwegen, während bei einer hohen Gewichtung Flächen angefahren werden, welche weitere Fahrstrecken aufweisen, um dem FIFO-Prinzip zu genügen. Verglichen mit den Effekten der anderen Gewichtungsfaktoren ist der Einfluss von  $\gamma_3$  auf die Fahrstrecke am geringsten, aber dennoch nicht zu vernachlässigen. Dieser Faktor führt zur Bewertung der Sortierung in den Lagerblöcken. Interessanterweise wirkt dieser Faktor auch signifikant auf die Fahrstrecken ein. Dies ist folgendermaßen zu erklären: bei einer hohen Ausprägung dieser Gewichtung werden Lager mit einem guten Sortiergrad angesteuert. Die Fahrstrecke wird entsprechend nicht berücksichtigt. Durch die dynamischen Zu- und Abgänge im Verlauf der Simulationszeit wird eine Agglomeration von Fahrzeugen gleicher Art entsprechend begünstigt und durch die folgenden selbststeuernden Entscheidungen der Fahrzeuge die räumliche Bildung von Lagerclustern verstärkt. Bei einer

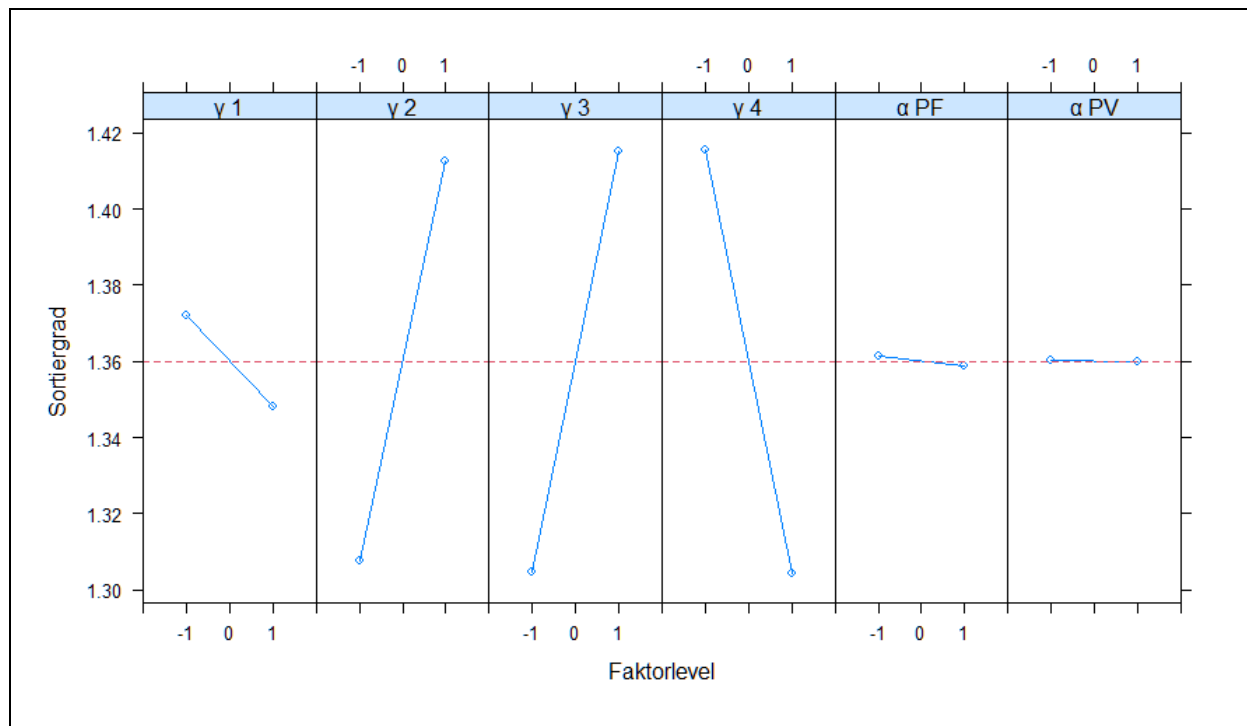
---

niedrigen Gewichtung entfällt der Druck zur räumlichen Verdichtung von Fahrzeuggruppen. Folglich können Lagerflächen mit kürzeren Fahrstrecken gewählt werden.

Hinsichtlich des Faktors  $\gamma_1$  kann ein qualitativer Unterschied zu den Ergebnissen des generischen Modells erkannt werden. In den Simulationsläufen des realen Szenarios führt eine hohe Ausprägung der Gewichtung des Faktors zu geringen Fahrstrecken und umgekehrt. Dieses Verhalten entspricht konzeptionell der ursprünglichen Intention des Gewichtungsfaktors. Der erste Term in der Gleichung (8) zielt darauf, die Standzeiten und Fahrstrecken der Fahrzeuggruppen gegeneinander abzuwägen und somit ähnlich wie bei klassischen Lagersystemen Fahrzeuge mit hoher Umschlagfrequenz besonders kurze Wege zu ermöglichen und Fahrzeuge mit längeren Verweildauern möglichst in entlegene Randbereiche zu platzieren. Diese unterschiedlichen Wirkweisen in dem generischen Modell und in dem realdatenbasierten Modell können durch das Kapazitätsangebot, die Terminalstruktur und die Szenariokomplexität erklärt werden. In dem generischen Modell werden durch die Einlastungsfunktion temporär starke kapazitive Überlastsituationen und Unterlastsituationen generiert. Eine starke Bewertung des Terms 1 durch  $\gamma_1$  kann in dem generischen Modell dazu führen, dass Fahrzeuge trotz freier Lagerkapazitäten aufgrund ihrer durchschnittlichen Standzeiten in Randbereiche zugeordnet werden. Derartiges Übersteuern ist in dem realdatenbasierten Szenario schwerer möglich. Da der Kapazitätsbedarf über die Simulationsdauer stabiler verläuft als in dem generischen Modell, sind Zuordnungen in extreme Randbereiche seltener. Ein weiterer Aspekt ist die komplexere Zusammensetzung der Fahrzeuggruppen: in dem generischen Modell führt die geringe Anzahl von Fahrzeuggruppen (36 Gruppen) bei der Berechnung von Term 1 zu einem stufigeren Wertebereich als es bei dem realdatenbasierten Modell mit 7073 Fahrzeuggruppen der Fall ist. Somit entstehen hierdurch bei der Bewertung von Lagerreihen hinsichtlich dieses Terms in dem generischen Modell deutlichere Abstufungen. So können in dem generischen Modell bei hohen Werten des Gewichtungsfaktors  $\gamma_1$  Entscheidungen eher übersteuern und weiter entfernte Flächen präferieren. In dem realdatenbasierten Szenario ist der Wertebereich deutlich feingranularer abgestuft und begünstigt somit auch differenzierte Entscheidungen der Fahrzeuge. Ein weiterer Unterschied zwischen den Modellen sind die statischen Standzeiten in dem generischen Modell. Sie unterliegen zwar einer Normalverteilung als Zufallsvariablen, aber die Mittelwerte der Standzeiten sind über die gesamte Simulationsdauer konstant. Die Standzeiten in dem realen Szenario variieren hingegen stärker und die Mittelwerte können sich im Verlauf der Simulationszeit verschieben. Konzeptionell wurde der Term 1 so angelegt, dass die selbststeuernden Entscheidungen sich an diesen Variationen der Standzeiten anpassen können und daher auch die Aufstellung der Fahrzeuge über den Zeitverlauf entsprechend verschieben. Aufgrund der statischen Standzeiten konnte dies nicht in dem

generischen Modell beobachtet werden. In diesem komplexen realdatenbasierten Fall scheint der geplante Mechanismus hingegen wirksam zu sein.

Die Abbildung 73 zeigt analog zur vorherigen Abbildung die Wirkung der Hauptfaktoren auf den normierten Sortiergrad. Auffallend ist, wie schon bei dem generischen Modell, dass die beiden Evaporationskonstanten keinen nennenswerten Einfluss auf den Sortiergrad haben. Wie bereits beschrieben ist diese Beobachtung zu erwarten, da die beiden Parameter nicht in den Bewertungstermen mit Bezug zur Sortierung genutzt werden.



**Abbildung 73: Einfluss der Faktoren auf den normierten Sortiergrad**

Die Wirkung der Parameter  $\gamma_2$ ,  $\gamma_3$ , und  $\gamma_4$  sind gut mit den Beobachtungen am generischen Modell vergleichbar. Erwartungsgemäß führt eine hohe Gewichtung des Parameters  $\gamma_3$  zu hohen Sortiergraden. Wie bereits beschrieben, zielt dieser Parameter konzeptionell direkt auf die Sortierung. Auch  $\gamma_2$  zielt indirekt auf die Sortierung. Durch eine hohe Gewichtung des Faktors wird die Gruppierung von Fahrzeugen gleichen Alters begünstigt. Die Wirkung von  $\gamma_4$  ist ebenfalls wie schon bei dem generischen Modell zu erklären. Eine hohe Gewichtung führt zu Entscheidungen, welche einzig kurze Fahrdistanzen präferieren. Das Sortierergebnis wird zugunsten der Fahrstrecken verschlechtert. Der Faktor  $\gamma_1$  wirkt weniger stark auf das Sortierergebnis. Hierbei führt eine hohe Gewichtung zu geringeren Sortiergraden. Wie die Abbildung 72 bereits gezeigt hat, wird in diesem Modell die Fahrdistanz über diesen Faktor positiv beeinflusst. Scheinbar führt diese Verbesserung der Fahrstrecken zu einer stärkeren

---

Durchmischung der Fahrzeuggruppen auf den Zielflächen und somit zu geringeren Sortiergraden.

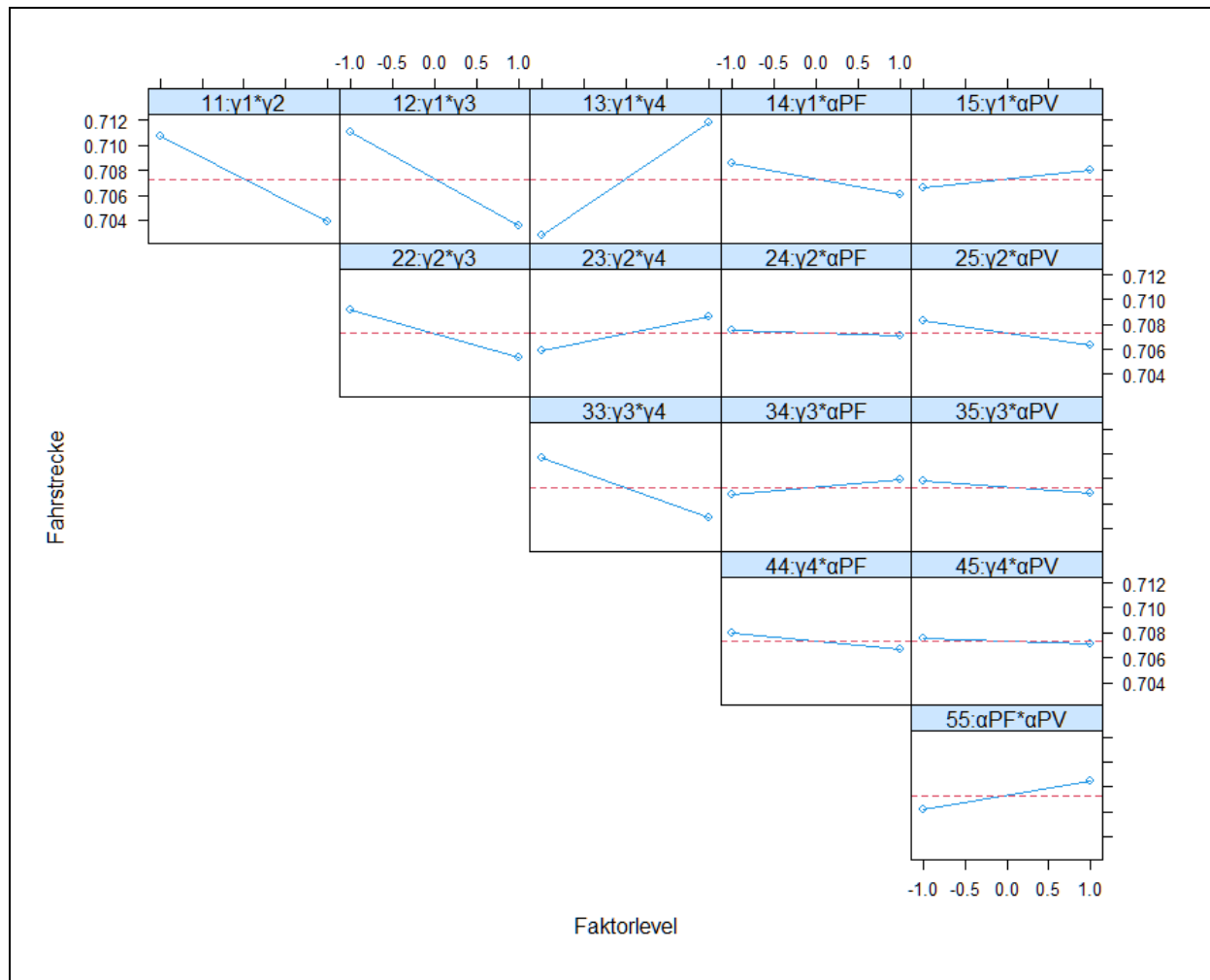
Hinsichtlich der Wirkung der einzelnen Faktoren ist festzuhalten, dass die Beobachtungen am generischen Modell und an dem realdatenbasierten Fall größtenteils vergleichbar sind. Lediglich der Faktor  $\gamma_1$  führt sowohl bei den Fahrstrecken als auch bei dem Sortiergrad zu unterschiedlichen Ergebnissen. Die beobachtete Wirkung des Faktors entspricht der konzeptionell geplanten Funktionsweise lediglich in dem realdatenbasierten Modell. Diese Abweichung kann, wie bereits diskutiert, durch die geringere Problemkomplexität des generischen Modells erklärt werden.

Für die vollständige Analyse zeigt die folgende Abbildung 74 die zweidimensionalen Faktorwechselwirkungen für alle Faktoren bezogen auf die beobachteten Fahrstrecken. Deutliche Wechselwirkungen können zwischen den Faktoren  $\gamma_1$  mit  $\gamma_2$ ,  $\gamma_3$  und  $\gamma_4$  erkannt werden. Wie schon bei dem generischen Modell führt eine hohe Gewichtung von  $\gamma_1$  (Verhältnis von Standzeit zur Lagerposition) zusammen mit  $\gamma_2$  (Einhaltung von FIFO) zu vergleichsweise geringen Fahrstrecken. Wahrscheinlich werden Fahrzeuggruppen gleichen Alters durch diese Kombination gut positioniert und durch die hohe Tendenz zur FIFO-Einhaltung nicht räumlich getrennt. Folglich können viele Fahrzeuge dieser Gruppen von den kurzen Distanzen profitieren. Ein ähnlicher Effekt ist auch für die Kombination von  $\gamma_1$  mit  $\gamma_3$  (Sortierungspräferenz) zu erkennen. Auch dieses Ergebnis kann analog erklärt werden. Durch die hohe Bewertung der Sortierungspräferenz werden Fahrzeuggruppen tendenziell räumlich nahe allokiert. Besonders interessant sind Wechselwirkungen von  $\gamma_1$  mit  $\gamma_4$  (Fahrstrecken). Konzeptionell zielen beide Faktoren auf die Reduktion von Fahrstrecken. Dennoch zeigt die Abbildung 74 deutlich, dass längere Fahrstrecken realisiert werden, wenn beide Faktoren gleichzeitig hoch gewichtet sind. In diesem Fall hebt sich der gewünschte Effekt dieser Faktoren auf. Die Analyse, welcher Faktor dominierend in seiner Wirkung ist, wird im Rahmen der Detailbetrachtung der einzelnen Faktorwirkungen diskutiert (siehe auch Abbildung 76). Auch das Zusammenwirken von  $\gamma_1$  und  $\alpha_{PF}$  weist eine erkennbare Interaktion auf. Sind beide Faktoren stark ausgeprägt, so scheint sich die Fahrstrecke zu verringern.

Die Abbildung 74 lässt erkennen, dass relevante Interaktionen zwischen den Faktoren  $\gamma_2$  und  $\gamma_3$ ,  $\gamma_2$  und  $\gamma_4$  sowie  $\gamma_3$  und  $\gamma_4$  vorhanden sind. Interessanterweise beeinflusst die Wechselwirkung zwischen  $\gamma_2$  und  $\gamma_3$  die realisierten Fahrstrecken, obwohl beide Parameter konzeptionell nur die Fahrzeugsortierung und die Einhaltung des FIFO-Prinzips adressieren. Diese Beobachtung belegt, dass die intendierte implizite Wirkung der einzelnen Terme der Pheromonberechnung auf die KPIs gegeben ist. Anscheinend begünstigen die Faktoren die Aufstellung der Fahrzeuggruppen so, dass bei einer hohen Ausprägung kurze Fahrdistanzen



möglich werden. Diesen Zusammenhang bestätigt auch die Wechselwirkung zwischen  $\gamma_3$  und  $\gamma_4$ .

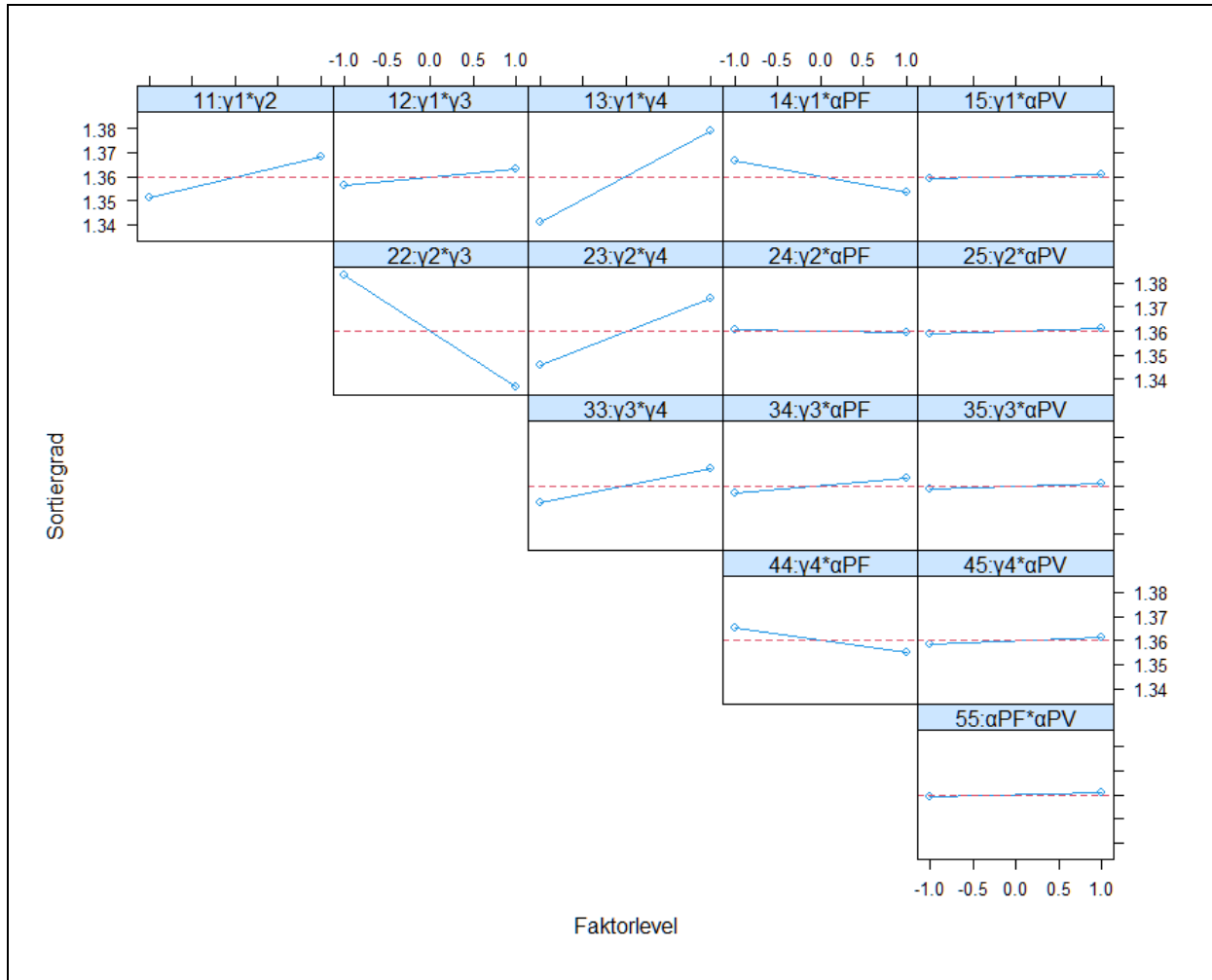


**Abbildung 74: Zweidimensionale Faktorwechselwirkungen (Fahrstrecke) - Realmodell**

Bei einer hohen Gewichtung beider Faktoren wurde eine Reduktion der Fahrwege beobachtet. Durch die hohe Gewichtung von  $\gamma_4$  suchen die Fahrzeuge grundsätzlich Lagerorte, welche mit kurzen Fahrstrecken verbunden sind. Durch die in dieser Kombination hohe Gewichtung der Sortierung werden tendenziell Fahrzeuge stärker gruppiert. Somit profitieren nachfolgende Fahrzeuge von den vorangegangenen autonomen Entscheidungen und wählen ebenfalls benachbarte Lagerorte mit kurzen Fahrstrecken.

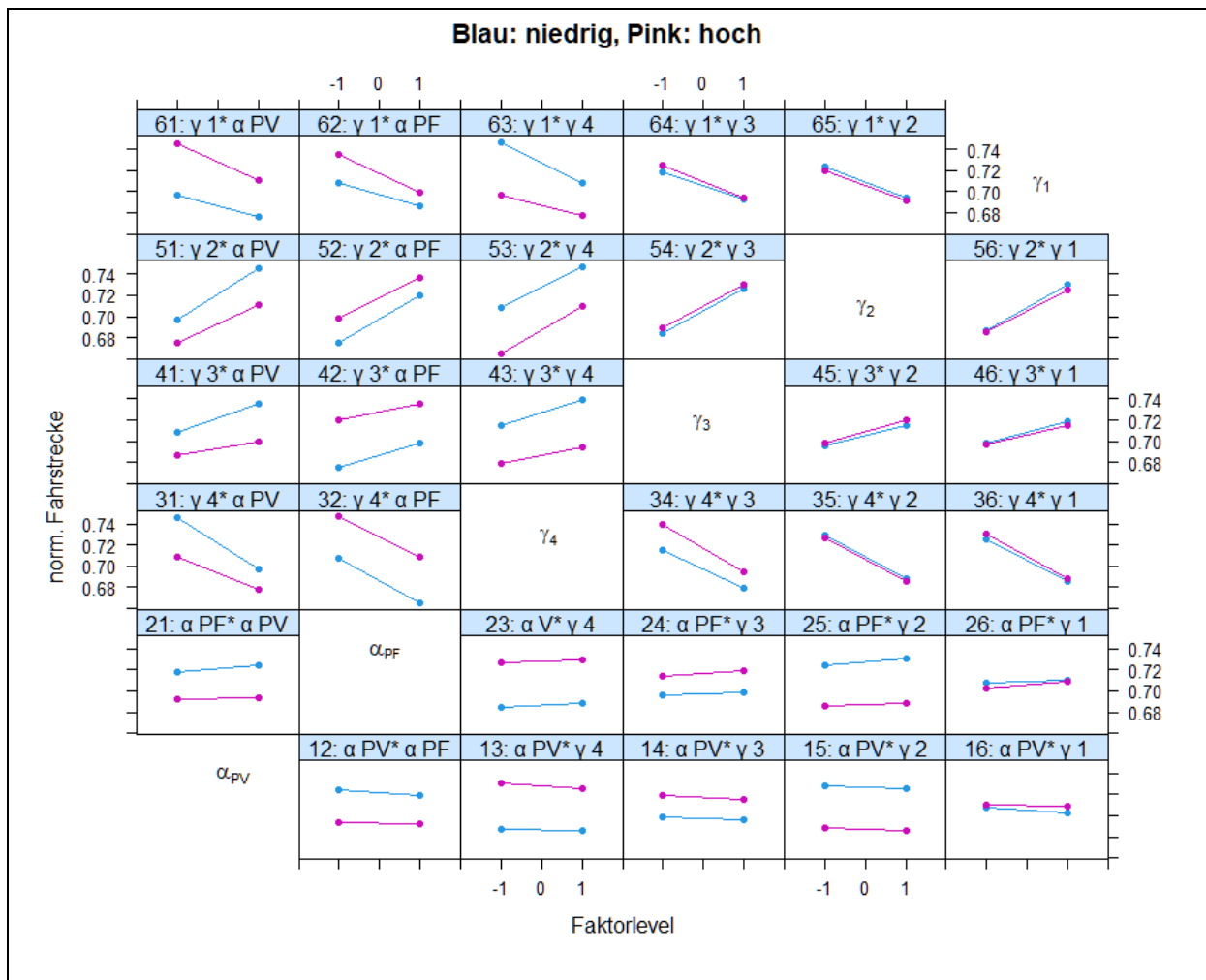
Die Abbildung 75 zeigt die Ergebnisse der Wechselwirkungen hinsichtlich des Sortiergrads analog zu der Abbildung 74. Sie zeigt, dass insbesondere die Faktoren, welche konzeptionell direkt auf den Sortiergrad wirken sollen, relevante Wechselwirkungen mit anderen Faktoren aufweisen. Hierbei ist vor allem die Wechselwirkung zwischen  $\gamma_2$  und  $\gamma_3$  erwähnenswert. Diese Faktorkombination hat den stärksten beobachteten Einfluss auf den Sortiergrad. Auch die Abbildung 75 verdeutlicht, dass die Wechselwirkung von  $\gamma_2$  und  $\gamma_4$  einen ebenfalls relevanten

Einfluss auf den Sortiergrad hat. Wie schon bei der Analyse des direkten Einflusses der Faktoren auf den Sortiergrad vermutet wurde, zeigen die Evaporationskonstanten auch hinsichtlich der Wechselwirkungen einen geringen Einfluss auf den Sortiergrad. Lediglich die Kombination von  $\gamma_1$  und  $\alpha_{PF}$  hat einen schwachen Einfluss auf den Sortiergrad.



**Abbildung 75: Zweidimensionale Faktorwechselwirkungen (Sortiergrad) - Realmodell**

Abschließend zeigen die Abbildung 76 und die Abbildung 77 die expliziten wechselseitigen Wirkungen der Faktoren untereinander. Die Abbildungen zeigen, nicht wie die vorherigen Abbildungen, den Beitrag der Faktorkombinationen auf den Gesamteffekt, sondern die beobachteten Wirkungen für die jeweiligen Faktorausprägungen. Wie schon bei dem generischen Modell sind in der Abbildung 76 keine gegeneinander wirkenden Faktoren zu finden. Deutlich zu erkennen ist, dass die Evaporationskonstanten sehr geringe Wechselwirkungen mit anderen Faktoren aufweisen. Die Ausprägungen der anderen Faktoren führen im Zusammenspiel mit den Evaporationskonstanten zu nahezu parallelen Verläufen (vgl. Plots 21-26 und 12-16). Diese Beobachtung ist nahezu deckungsgleich mit den Erkenntnissen vom generischen Modell (vgl. Abbildung 65).



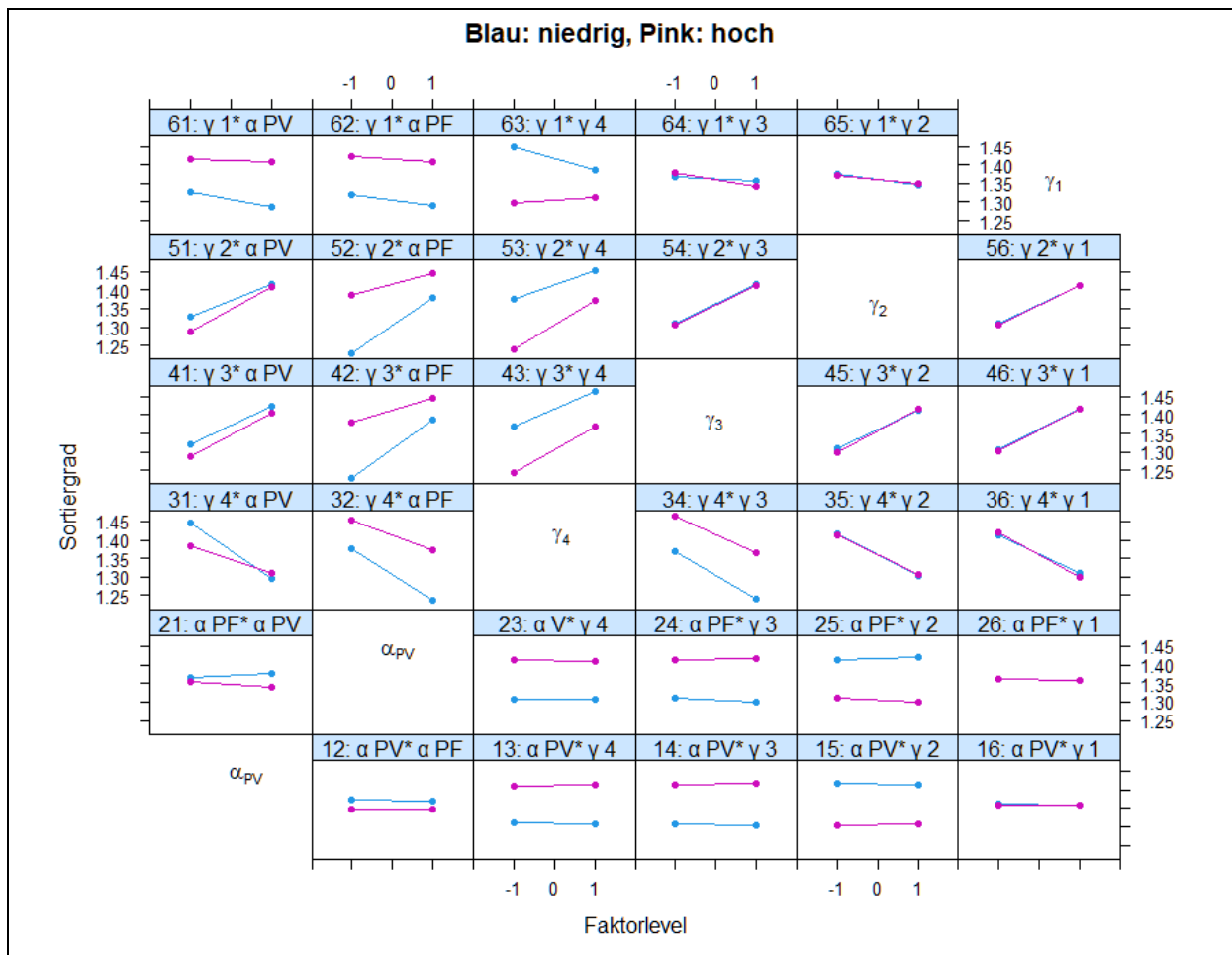
**Abbildung 76: Faktorkombinationen und normierte Fahrstrecken**

Auch die übrigen Wechselwirkungseffekte zwischen den anderen Faktoren sind sehr ähnlich zu den bereits am generischen Modell gewonnenen Erkenntnissen. Dies wird beispielsweise bei der Betrachtung der Grafiken 31-36 in den jeweiligen Abbildungen deutlich. Sowohl in dem generischen, also auch in dem realdatenbasierten Modell führt eine hohe Ausprägung des Faktors  $\gamma_4$  zu verkürzten Fahrwegen. Dies entspricht in beiden Fällen der gewünschten Wirkweise für den Gewichtungsfaktor  $\gamma_4$ .

Neben diesen Gemeinsamkeiten sind auch Unterschiede zwischen den Wechselwirkungen in dem generischen und dem realdatenbasierten Modell erkennbar. So weichen die Wechselwirkungen von  $\gamma_1$  mit den übrigen Faktoren qualitativ ab. Die Abbildung 76 zeigt, dass alle Faktorkombinationen bei hohen Ausprägungen von  $\gamma_1$  zu geringeren Fahrstrecken führen. Diese Beobachtung bestätigt die mit diesem Faktor beabsichtigte Wirkung, indem die Fahrstrecken durch eine höhere Gewichtung der Flächennutzungs-Balance verkürzt werden können. Dies belegt zudem die Vermutung, dass der Gewichtungsfaktor und der erste Term

des Pheromonwerts in dem generischen Modell aufgrund der mangelnden Problemkomplexität nicht wie gewünscht wirken konnte.

Abschließend zeigt die Abbildung 77 die Faktorwechselwirkungen in Bezug auf den Sortiergrad. Wie schon bei den Fahrstrecken können keine sich in ihrer Wirkung gegenseitig aufhebende Effekte erkannt werden. Die klare Tendenz von starken relevanten Wechselwirkungen von  $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$  mit den übrigen Faktoren, welche schon in Abbildung 75 erkannt wurde, wird durch die Abbildung 77 bestätigt, während die Evaporationskonstanten geringe Wechselwirkungen aufweisen.



**Abbildung 77: Faktorkombinationen und normierter Sortiergrad**

Aufgrund ihrer konzeptionellen Ausrichtung sind für  $\gamma_2$  und  $\gamma_3$  starke Wechselwirkungen zu erwarten. Die Abbildung zeigt, dass auch in Kombination mit anderen Faktoren eine hohe Ausprägung von  $\gamma_2$  oder  $\gamma_3$  zu hohen Sortiergraden führt. Auch die bereits beschriebene Wirkung des Faktors  $\gamma_4$  auf die Sortierung kann durch die Abbildung 77 bestätigt werden. In Kombination mit den anderen Faktoren führt eine hohe Gewichtung ebenfalls zu kurzen Fahrstrecken und zu einem verringerten Sortiergrad und umgekehrt. Beim Vergleich mit den

---

Wechselwirkungen bei dem generischen Modell (Abbildung 71) können auf qualitativer Ebene keine nennenswerten Unterschiede erkannt werden. Die Verläufe der beobachteten Wechselwirkungen sind fast identisch. Hieraus kann geschlossen werden, dass die Wechselwirkungen hinsichtlich des Sortiergrads bei dem generischen Modell und bei dem realdatenbasierten Modell nahezu identisch sind. Auch insgesamt kann zusammenfassend festgehalten werden, dass die Analyse der Faktorwirkungen in dem realdatenbasierten Fall die intendierten Wirkweisen der Methodenparameter bestätigt.

### **6.3 Zusammenfassung der Evaluation**

Im Rahmen der Zielstellung dieser Arbeit sollte die Evaluation die Leistungsfähigkeit der neuen pheromonbasierten Methoden untersuchen und ihre Einsatzeignung unter komplexen dynamischen Rahmenbedingungen überprüfen. Zu diesem Zweck wurden die neuen Selbststeuerungsmethoden zunächst an einem generischen Modell eines Automobilterminals erprobt. Die Analyse wurde stufenweise aufgebaut und mittels eines Hypothesensystems strukturiert. Das Hypothesensystem bildet die postulierten Erwartungen und Anforderungen an einen Lösungsansatz ab und erlaubte eine differenzierte Analyse im Rahmen der Hauptstudie. Zunächst wurde untersucht, ob eine pheromonbasierte Steuerung grundsätzlich die Leistungsfähigkeit bei steigender Dynamik und Komplexität erhöhen kann. Die Hypothesen H1 und H2 konnten im Zuge der Evaluation ohne Einschränkungen bestätigt werden. So wurde die Leistungsfähigkeit der selbststeuernden Flächenzuordnung in Szenarien mit steigender Dynamik nachgewiesen (siehe 6.1.5). Die Erhöhung der strukturellen Komplexität durch die Erhöhung von der Anzahl verfügbaren Lagerflächen und der Anzahl Fahrzeuggruppen zeigte, dass die selbststeuernde Flächenzuweisung im Hinblick auf alle KPIs zu einer besseren Leistung führt als konventionelle manuelle und algorithmische Ansätze. Aufbauend auf dieser Basisanalyse wurde überprüft, ob die zusätzliche Integration von Entscheidungen für Verkehrsmittel einen positiven Einfluss auf die Zielerreichung und die KPIs hat. Im Rahmen dieser Analyse konnte die Hypothese H3 ebenfalls verifiziert werden. In den ausführlichen Untersuchungen an dem generischen Simulationsmodell wurde erkannt, dass die integrierte selbststeuernde Zuordnung von Fahrzeugen zu Flächen und die Verkehrsmittelzuordnung zu einer höheren logistischen Systemleistung führt, als klassische Ansätze. Für den Vergleich wurden bestehende algorithmische Ansätze für die Flächen- und die Liegeplatzzuweisung verwendet. Die Evaluation an dem generischen Modell zeigte, dass ein kombinierter Einsatz der pheromonbasierten Selbststeuerungsmethode zu den besten Ergebnissen führte. Weiterhin wurde die Wirksamkeit der einzelnen Parameter der Selbststeuerungsmethoden untersucht, um zu überprüfen, ob sie wie in der Konzeptionsphase geplant wirken. Diese Analyse basierte auf einer vollfaktoriellen Versuchsplanung. Die Auswertung zeigte, dass

---

nahezu alle geplanten Parametereffekte beobachtet werden konnten. Hierbei wurde erkannt, dass die Wirkung der Gewichtungsfaktoren stärker als die der Evaporationskonstanten ist.

Nach dem Nachweis der Wirksamkeit der neuen Methoden in einer theoretischen generischen Versuchsanordnung wurde mit der Untersuchung der Hypothese H4 die Übertragbarkeit und die Anwendbarkeit der Methoden auf realistische Anwendungsfälle überprüft. Zu diesem Zweck wurde ein Simulationsmodell eines realen Terminals mit den zugehörigen Bewegungsdaten von einem gesamten Jahr aufgebaut. Im Zuge der Evaluation wurde die Leistungsfähigkeit des kombinierten Einsatzes der pheromonbasierten Steuerung mit den bestehenden KPIs verglichen. Auch diese Analyse zeigte, dass die selbststeuernden Methoden zu einer deutlichen Steigerung der logistischen Leistungsfähigkeit bei den betrachteten KPIs führt. Die Hypothese H4 konnte somit ebenfalls verifiziert werden. Weiterhin wurden die Parameterwirkungen zur Absicherung der Ergebnisse mittels eines vollfaktoriellen Versuchsplans untersucht. Hierbei deckten sich die wesentlichen Erkenntnisse mit denen, welche an dem generischen Modell beobachtet wurden. Auch in dem realdatenbasierten Modell wirken die Parameter der Selbststeuerungsmethoden wie konzeptionell geplant.

Daher können abschließend diese Ergebnisse zur Verifizierung der Hypothese H5 zusammengezogen und verdichtet werden. Alle Ergebnisse belegen, dass eine integrierte pheromonbasierte Selbststeuerung zu einer gesteigerten logistischen Leistung geführt haben. Sowohl die Fahrstecken als auch der Sortiergrad konnten durch die neuen Methoden positiv beeinflusst werden. Bei zunehmender Systemdynamik und Komplexität waren die kombinierten Methoden besonderes erfolgreich, im Vergleich mit den klassischen Ansätzen. Hierbei haben die beiden neuen Selbststeuerungsmethoden ausschließlich vorhandene vergangenheitsbezogene Daten verwendet. Die Hypothese H5 postulierte weiterhin, dass die in dieser Arbeit vorgestellte Planungsmethodik in Automobilterminals anwendbar ist. Dies kann durch die Analyse bestätigt werden. Die ausgewählte Selbststeuerung wurde so gestaltet, dass keine weiteren Vorplanungsergebnisse (z.B. Flächenmasterplan oder Liegeplatzvorplanung) benötigt werden. Alle relevanten Informationen werden direkt auf den Ausführungsebenen gesammelt und im Zuge der Steuerung verwendet. Die verwendeten Steuerungsmethoden benötigten lediglich, wie in der Abbildung 40 vorgeschlagen, Definitionen bezüglich relevanter Gruppierungsstammdaten. In den Analysen wurde hierfür die gebräuchliche HMD-Gruppierung verwendet. Somit wurde für alle Simulationsläufe unter der Nutzung der Selbststeuerung, kein kaskadierter Planungsprozess durchlaufen. Die klassischen Planungsschritte konnten ersatzlos entfallen und wurde somit in die Ausführungsebene integriert. Alle relevanten Entscheidungen wurden lokal aufgrund von vergangenheitsbezogenen Daten getroffen. Dennoch wurde die Leistungsfähigkeit im Vergleich zu den klassischen planerischen Ansätzen gesteigert. Die Abbildung 40 schlägt im

---

Zuge der neuen Planungsmethodik neue Planungsaufgaben in Form der Methoden und Parametergestaltung vor. Diese wird durch die Simulationsergebnisse ebenfalls bestätigt: Die vollfaktorielle Untersuchung der Methodenparameter zeigt, dass die Parameter der entwickelten Selbststeuerungsmethoden zielgerichtet für den jeweiligen Anwendungsfall angepasst werden können. Die Gestaltung und die Anpassung der Parameter der zugrundeliegenden Selbststeuerungsmethode sind somit in der neuen Planungsmethodik neue wichtige Planungsaufgaben. Abschließend kann somit die Hypothese H5 bestätigt werden: die neue Selbststeuernde Planungsmethodik ist grundsätzlich unter realen Rahmenbedingungen anwendbar und kann die Schwachstellen des klassischen kaskadierten Planungsprozesses überwinden.

## **7. Entwicklung von Handlungsempfehlungen zur Umsetzung**

Durch die umfangreiche Analyse der neuen Lösungen im Zuge der beschriebenen Detailstudien wurde das evaluative Ziel dieser Arbeit erfolgreich erreicht. Der Nachweis der grundsätzlichen Eignung der neuen Methodik für den Einsatz an Automobilterminals konnte erbracht werden. Die neue Methodik kann die Nachteile des klassischen kaskadierten operativen Planungsprozesses überwinden und zu gesteigerter logistischer Leistung unter komplexen dynamischen Bedingungen führen. Gemäß dem geplanten Vorgehen (siehe Abbildung 1) stellt das Erreichen des Evaluativen Ziels die Voraussetzung für Betrachtung einer tatsächlichen Umsetzbarkeit im Rahmen des Explorativen Ziels dar. Für die Beurteilung der systemischen Umsetzbarkeit der neuen Methodik sollen im Folgenden zunächst die Voraussetzungen betrachtet werden, um dann auf dieser Grundlage die Potenziale und die Grenzen einer Umsetzung zu diskutieren. Abschließend wird aus diesen Betrachtungen ein Umsetzungsleitfaden auf der Basis des Vergleichsterminals in Bremerhaven abgeleitet.

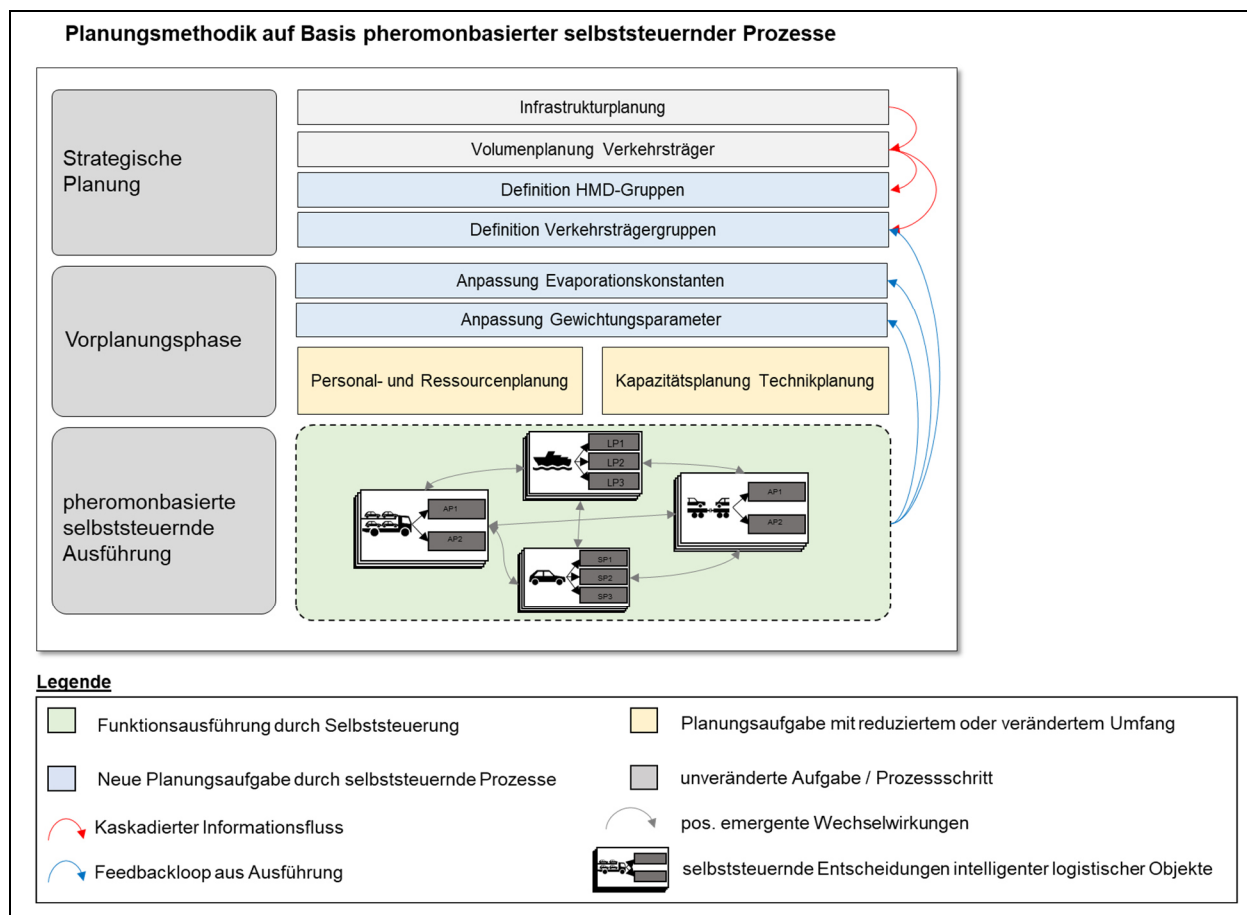
### **7.1 Voraussetzungen für den Einsatz der Methodik in Automobilterminals**

Im Folgenden sollen die Voraussetzungen für eine erfolgreiche Umsetzung der neuen Ansätze beschrieben werden. Neben technischen Voraussetzungen, welche direkt aus den Selbststeuerungsmethoden resultieren, werden die relevanten Anforderungen aus den repräsentativen Beispielprozessen des Terminals in Bremerhaven abgeleitet.

#### **7.1.1 Konkretisierung des Zielbilds der neuen Planungsmethodik**

Die Abbildung 20 und Abbildung 40 verdeutlichen die Zusammenhänge des klassischen kaskadierten Planungsprozesses. Alle Schritte sind im zeitlichen Verlauf ausgehend von der strategischen Planung bis zur operativen Planung und der Prozessteuerung stark abhängig von den Ergebnissen der vorherigen Planungsschritte. Die Abbildung 40 zeigte auf dieser

Grundlage ein Zielbild für eine Planungsmethodik auf Basis selbststeuernder Prozesse, welches die Schwachstellen des bestehenden Planungsprozesses überwinden sollte. Dieses Zielbild diente als Ausgangspunkt für weitere Gestaltung der Methodik und der zugrundeliegenden Selbststeuerungsmethoden. Konzeptionell wurde die Steuerung durch die Nutzung eines pheromonbasierten Ansatzes so gestaltet, dass die klassischen planerischen diese Abhängigkeiten durchbrochen und viele der taktischen und operativen Planungsaufgaben direkt auf die Prozesssteuerungsebene übertragen werden konnten. Diese Verlagerung entspricht dem in der Abbildung 40 vorgestellten Zielbild. Für die abschließende Betrachtung einer möglichen Umsetzung ist dieses Zielbild für die entwickelte Ausgestaltung der Methodik, welche auf einer pheromonbasierten Selbststeuerung basiert, zu konkretisieren. Die folgende Abbildung 78 zeigt daher die angepasste Planungsmethodik. Die Volumenplanung und die Planung der Infrastruktur verändern sich auf der strategischen Ebene nicht. Im Zuge der Volumenplanung muss geprüft werden, ob die Terminalkapazitäten für die langfristig angekündigten Volumen der Kunden ausreichen.



**Abbildung 78: Planungsmethodik auf Basis pheromonbasierter Selbststeuerung**

Bereits auf der strategischen Planungsebene ist ein elementarer Unterschied zum klassischen Planungsmodell zu erkennen. Die Erstellung eines Flächenmasterplans auf der Grundlage von



---

Forecasts ist nicht mehr notwendig. Durch selbststeuernde Lagerplatzzuordnung kann dieser Planungsschritt ersatzlos entfallen. Folglich werden hier bereits die temporalen Abhängigkeiten von dem Flächenmasterplan gelöst.

Die Abbildung 78 zeigt als neue Aufgabe im Rahmen der strategischen Planung die Definition der für die Selbststeuerung zu verwendenden Gruppen für Fahrzeuge und für Verkehrsmittel. Konzeptionell sind diese Schritte unabdingbar, damit die in 5.3 und 5.4 beschriebenen Selbststeuerungsmethoden anwendbar sind. Diese definitorischen Planungsaufgaben legen zukünftig den Zuschnitt der Prozesse und zugehörigen Fahrzeugvolumina fest. Eine Anpassung dieser Gruppen kann künftig eine Möglichkeit sein, die Selbststeuerungsmethoden auf die langfristige Situation am Terminal einzustellen. Die Definition dieser Gruppen ist direkt abhängig von den bekannten Volumen- und Verkehrsträgerplanungen. Daher zeigt die Abbildung 78 eine kaskadierte Informationsverknüpfung für diese Planungsschritte.

Wie bereits bei dem Zielbild in Abbildung 40 diskutiert, ist eine zusätzliche Differenzierung nach taktischer und operativer Planung nicht notwendig. Somit resultieren auf der Ebene der Vorplanungsphase signifikante Unterschiede zum klassischen Planungsablauf. Durch die integrative selbststeuernde Zuordnung von Verkehrsmitteln zu Lade- und Entladepunkten ist eine entsprechende Vorplanung verschiedener Planungshorizonte auf der taktischen Planungsebene obsolet. In gleicherweise verhält es sich für die Flächennutzungsplanung. Aufgrund der Verlagerung der Zuweisungsentscheidungen auf die Steuerungsebene kann dieser Schritt entfallen. Wie bereits in dem Zielbild in Abbildung 40 angedeutet, sind jedoch neue Aufgaben denkbar und sinnvoll. Die Evaluation zeigte, dass die verwendeten Selbststeuerungsmethoden gut planbar auf Veränderungen der Parameter (Evaporationskonstanten und Gewichtungsfaktoren) reagieren. Somit können diese Parameter in Abhängigkeit aktuellen Situation variiert werden, um die Gesamtleistung des Terminals im Sinne des definierten Zielsystems zu optimieren.

Wie in dem Zielbild bereits formuliert, können die Aufgaben der operativen Durchführungsplanung durch den Selbststeuerungsansatz vereinfacht werden. Eine operative Festlegung von Lagerflächen zu Fahrzeugen kann ebenso wie die Festlegung von Lade- und Entladepunkten für die Verkehrsmittel entfallen. Hierdurch erhält die Personal- und Ressourcenplanung ein stärkeres Gewicht für die operative Planung. Zukünftig muss diese Planung festlegen, wie viel Personal für Fahrbewegungen und Technikleistungen eingeplant werden muss. Als wesentliches Ergebnis des Abgleichs von Aufträgen und verfügbarer Kapazität wird in diesem Schritt das für die Planungsperiode zu bearbeitende Volumen bestimmt. Dieses Volumen von freigegebenen Arbeitsaufträgen stellt auch weiterhin die Schnittstelle zur operativen Prozesssteuerung dar. Anders als beim klassischen Prozess werden auf dieser

---

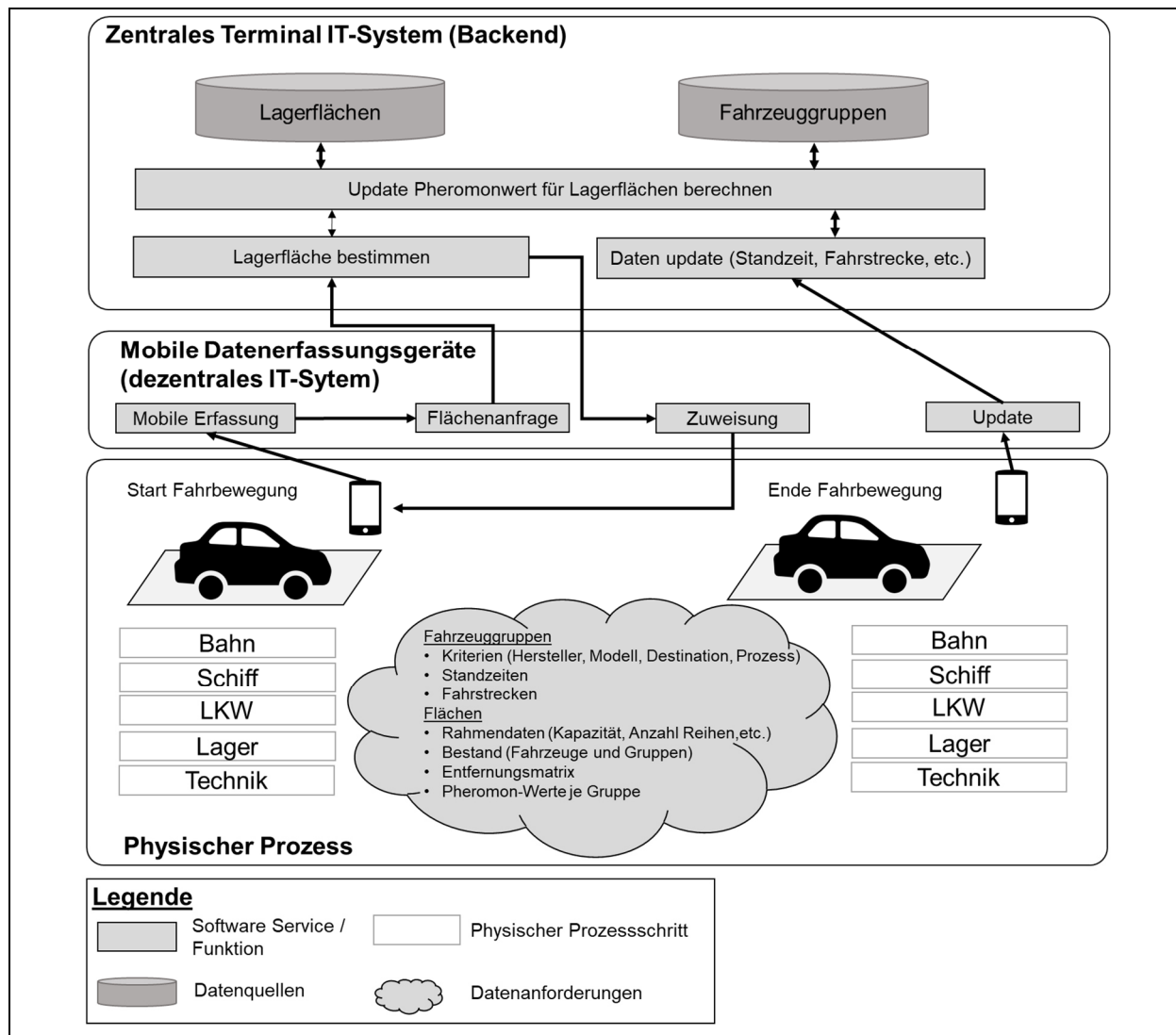
Ausführungsebene nun die Zuweisungen von Fahrzeugen zu Lagerflächen und von Verkehrsmitteln zu Ein- und Ausgangspunkten selbststeuernd übernommen.

Die Abbildung 78 unterstreicht die zentrale Rolle der lokalen Selbststeuerungsmethoden in der neuen Planungsmethodik, analog zu dem in Abbildung 40 festgehaltenen Zielbild. Folglich ist für eine Umsetzbarkeit der gesamten Planungsmethodik die Implementierung des gewählten Selbststeuerungsansatzes von integraler Bedeutung. Daher wird im Folgenden die Vereinbarkeit der Selbststeuerungsansätze sowie die grundlegenden technischen Voraussetzungen für die Anwendung der Selbststeuerungsmethoden detailliert betrachtet.

### 7.1.2 Grundlegende technische Anforderungen für die Umsetzung der Selbststeuerungsmethoden

Der Aufbau der Infrastruktur von selbststeuernden logistischen Systemen, kann sehr unterschiedlich gestaltet werden. Hierbei beschreibt die Infrastruktur einerseits die Informationserhebung (Sensorik), die Kommunikation der beteiligten logistischen Objekte sowie die Informationsverarbeitung und Entscheidungsfindung. Die räumliche Verortung dieser Fähigkeiten kann für ein selbststeuerndes System entsprechend frei gestaltet werden (Sowade et al., 2012). Angesichts dessen wird an dieser Stelle nicht eine explizite Infrastrukturgestaltungsvariante als Voraussetzung postuliert. Eine Umsetzung ist sowohl in einer zentralistischen, in einer partiell dezentralen als auch in einer vollständig dezentralen Anordnung denkbar. Für die folgende Diskussion wird daher auf eine mögliche infrastrukturelle Konfiguration fokussiert, welche auf die Gegebenheiten am Beispielterminal fokussiert und eine Integration mit möglichst geringer Veränderung der bestehenden Infrastruktur und Prozesse adressiert. Da eine realistische Umsetzung in der Regel in eine existierende hierarchisch zentral organisierte IT-Infrastruktur eines Terminals erfolgen wird, schlägt die folgende Abbildung eine idealisierte Umsetzung als partiell dezentrales System vor. Konzeptionsgemäß sollte der neue selbststeuernde Ansatz auf alle Fahrzeugbewegungen und Verkehrsmittel anwendbar sein. Daher beschreibt die Abbildung 79 den Lagerzuordnungsprozess allgemein für alle Prozesse (Bahn, Lkw, Schiff, Lager, Technik). Elementar für eine Umsetzung ist eine digitale Erfassung des Fahrzeugs mittels eines MDE (klassisches Handheld oder auch Smartphone). Durch die Erfassung des Fahrzeugs können im Terminalverwaltungssystem neue Software-Services für die selbststeuernde Zuordnung von Fahrzeugen angestoßen werden. Der Flächenzuordnungsservice fragt zunächst die Gruppierungseigenschaften des Fahrzeugs (z.B. HMD-Kombination) ab. Auf dieser Grundlage durchläuft die selbststeuernde Flächenzuordnung die verfügbaren Lagerorte und Lagerreihen und wählt den Lagerort mit dem besten Pheromonwert aus und weist dem Fahrzeug das entsprechende Lager zu. Das Ergebnis der selbststeuernden Flächenzuordnung wird

anschließend über den zentralen Service an das mobile Endgerät zurückgegeben und das Fahrpersonal führt die Fahrbewegung durch. Der zweite elementare Mechanismus des beschriebenen Selbststeuerungsansatzes besteht darin, die Pheromonwerte der Lagerreihen zu aktualisieren. Auch hierzu werden die Fahrbewegungen als auslösendes Ereignis verwendet, um einen zweiten zentralen Service zu nutzen.



**Abbildung 79: Möglicher logischer Infrastrukturaufbau für die Flächenzuordnung**

Hierfür werden bei allen Terminalbewegungen, welche nicht mit dem Eingang eines Fahrzeugs auf das Terminal in Verbindung stehen, genutzt. Für alle Bewegungen werden ebenfalls digitale MDE-Geräte genutzt. In dem Augenblick der Erfassung eines Fahrzeugs für eine Folgebewegung auf dem Terminal können anhand der Quelle-Senke-Beziehungen und einer vorliegenden Entfernungsmatrix die bisher geleisteten Fahrstrecken für die entsprechende Fahrzeuggruppe ermittelt und für die folgenden selbststeuernden Entscheidungen aktualisiert werden. In gleicher Weise können auch die Standtage je Gruppe und das Eingangsdatum der Fahrzeuge in Lagerreihen und Flächen aktualisiert werden. Auf dieser Grundlage können

---

wiederum die nachfolgenden selbststeuernden Entscheidungen von weiteren Fahrzeugen getroffen werden. Hinsichtlich der selbststeuernden Flächenzuordnung ist zusammenfassend festzuhalten, dass für eine Umsetzung die folgenden technischen Voraussetzungen erfüllt sein sollten: Das zentrale Lagerverwaltungssystem sollte um die beiden beschriebenen Services (Lagerzuordnung und Update der Pheromonwerte) erweitert werden. Hierzu sind unter Umständen auch Datenstrukturen anzupassen oder zu erweitern. So wird neben den vorhandenen Informationen zum aktuellen Bestand in den Lagerflächen und Reihen nun auch auf der Ebene der Lagerreihen die neue gruppenbezogene Pheromonart benötigt.

Sofern das Lagerverwaltungssystem nicht schon eine Segmentierung der Fahrzeuge in die gewünschten Gruppen (z.B. HMD-Kombinationen) anbietet, muss diese Funktion ebenfalls aufgebaut werden. Ebenso sollte das System die Zuordnung der Fahrzeuge (auf Ebene der Fahrgestellnummern) im Bestand zu diesen Gruppen umfassen. In der Regel beinhalten Lagerverwaltungssysteme bereits ähnliche Informationen. Auch die fahrzeugbezogenen Standtage sollten auf dieser Gruppenebene systemisch verfügbar sein. Diese Information ist für eine erfolgreiche Umsetzung des Update-Services ebenfalls von elementarer Bedeutung. Weiterhin muss für die Umsetzung des Update-Services das Lagerverwaltungssystem detaillierte Informationen zu den Entfernungen zwischen den Lagerplätzen in Form einer Entfernungsmatrix besitzen, um die zurückgelegten Entfernungen für die Berechnung der neuen Pheromonwerte zu ermöglichen.

Die Umsetzung der pheromonbasierten Verkehrsmittelzuordnung benötigt ähnliche Datenstrukturen. Wie bei der konzeptionellen Beschreibung in 5.4 fokussiert die selbststeuernde Auswahl eines Ankunftspunkts zu Be- und Entladung lediglich auf die zurückgelegten Distanzen der Fahrzeuge, zu den jeweiligen Verkehrsmittelgruppen. Die systemische Gruppierung von Verkehrsmitteln (z.B. Schiffe mit bestimmten vordefinierten Destinationen) stellt wahrscheinlich eine neue Betrachtungsweise für die bestehenden Terminalverwaltungssysteme dar. So verfügt das betrachtete Beispielterminal aktuell über keine systemischen Gruppierungsmöglichkeiten für Verkehrsmittel und eine entsprechende Zuordnung von Fahrzeugen. Für eine erfolgreiche Umsetzung ist die Einrichtung von Verkehrsmittelgruppen allerdings erforderlich. Hierdurch können für die Verkehrsmittel der Gruppen entsprechende durchschnittliche Fahrstrecken für jeden Ankunftspunkt (Liegeplätze bei Schiffen, Ladebucht bei Lkws oder Gleisanschluss bei der Bahn) ermittelt und die pheromonbasierte Auswahl eines entsprechenden Punkts zur Be- und Entladung umgesetzt werden. Wie schon bei den Fahrzeugen obliegt die Gestaltung der Gruppen (also die Definition der Eigenschaften, die eine Gruppe bestimmen) dem jeweiligen Anwendungsfall.

---

Im Folgenden sollen neben den bereits beschriebenen technischen Anforderungen nun die prozessbezogenen Anforderungen basierend aus den Erkenntnissen des Beispielterminals gewonnen werden.

### 7.1.3 Umsetzbarkeit in den Wareneingangsprozessen

Die Abbildung 32 und die Prozessdiagramme im Anhang zeigen die Wareneingangsprozesse des Beispielterminals. Allen Prozessen ist gemein, dass sie eine initiale Vereinnahmung auf dem Terminal mittels eines MDE-Geräts besitzen. In dem aktuellen Prozess werden gemäß der vordefinierten Flächenmasterplanung aus dem kaskadierten Planungsprozess Lagerplätze ausgewählt. Dieser Schritt könnte direkt durch den unter 7.1.2 beschriebenen selbststeuernden Lagerzuordnungsservice substituiert werden. So könnte ohne Veränderung der jeweiligen Prozesse eine Umsetzung ohne weitere Aufwände umgesetzt werden. Diese Umsetzung setzt lediglich die bereits beschriebenen technischen und datendefinitiven Anforderungen voraus. Insbesondere die Segmentierung der eingehenden Fahrzeuge in Gruppen ist eine elementare Voraussetzung. Wie bereits beschrieben, kann die Differenzierung der Gruppen vom Anwender frei gewählt und gestaltet werden. Auch ist in diesem Zusammenhang eine feingranularere Unterscheidung der eingehenden Fahrzeugmengen denkbar. Beispielsweise könnten weitere Eigenschaften, wie z.B. der jeweilige Eingangspunkt auf dem Terminal, zur Gruppenbildung herangezogen werden.

Bei näherer Betrachtung der Prozesse in den BPMN 2.0 Diagrammen zum Wareneingang kann erkannt werden, dass die Fahrbewegungen in dem Terminalbeispiel durch Gruppen von Fahrern durchgeführt werden, welche nach der Fahrbewegung durch ein Shuttle abgeholt und dann zum Ausgangsort der nächsten Fahrbewegung gebracht werden. Diese Art der Prozessdurchführung kann einen neuen Problembereich öffnen. Die Analysen haben gezeigt, dass die neuen Methoden grundsätzlich die Fahrzeuge gleicher Art in räumlicher Nähe zusammen lagern. Dennoch kann nicht vollständig ausgeschlossen werden, dass einzelne Selbststeuerungsentscheidungen zu einer größeren räumlichen Verteilung der Fahrzeuge führen können. In diesen Fällen würden längere fächerförmige Shuttlefahrten entstehen, welche wiederum negativ auf die Produktivität wirken würden. Allerdings sind diese Effekte nicht auf eine selbststeuernde Flächenvergabe beschränkt, sondern sie treten auch bei einer masterplangesteuerten Flächenvergabe auf. Grundsätzlich wurde dieses Problem der konventionellen Shuttleabholung bereits erkannt. Vorgeschlagene Lösungsprinzipien, wie eine personalisierte Auftragssteuerung (Hoff-Hoffmeyer-Zlotnik et al., 2020b), können diese Effizienzprobleme lösen. Eine entsprechende individualisierte Auftragssteuerung würde auch für eine selbststeuernde Flächenzuordnung unproduktive Einsammelsituationen vermeiden.

---

Auch die selbststeuernde Zuordnung von Verkehrsmitteln zu entsprechenden Entladepunkten kann, wie konzeptionell vorgesehen, leicht umgesetzt werden. Hier ist ebenfalls die wesentliche Voraussetzung eine sinnvolle gruppenbasierte Differenzierung der Verkehrsmittel und das Tracking der resultierenden Fahrstrecken für die Fahrzeuge, welche von dem Verkehrsmittel entladen werden. In gleicher Weise kann auch für die eingehenden Verkehrsmittel die Bildung von geeigneten Gruppen frei gewählt werden. So könnten z.B. für eingehende Züge eine Unterscheidung nach den Abfahrtsorten (üblicherweise sind dies die Werke der OEMs) verwendet werden. Auch für Lkws und eingehende Schiffe könnte eine Unterscheidung nach Herstellungswerken ein weiteres sinnvolles Unterscheidungskriterium sein.

#### 7.1.4 Umsetzbarkeit bei Lagerbewegungen und Technikbearbeitungen

Die Umsetzbarkeit des neuen Ansatzes der pheromonbasierten Flächenzuordnung für Lager- und Technikbewegungen ist ähnlich wie die der Wareneingänge zu bewerten. Von technischer Seite bestehen keine weiteren zusätzlichen Anforderungen. Auch für die Integration dieser Prozesse besteht lediglich der Bedarf, die Fahrzeuge, welche bewegt werden sollen, in logisch sinnvolle Gruppen zu unterscheiden. Für die Bewegungen zur Technikbearbeitung könnte ein zusätzliches Kriterium die Art der durchzuführenden Technikleistung sein.

#### 7.1.5 Umsetzbarkeit in Warenausgangsprozessen

Für die Warenausgangsprozesse spielt die selbststeuernde Flächenzuordnung eine untergeordnete Rolle. Zum Zeitpunkt der Ausgangsbewegung verweilen die Fahrzeuge üblicherweise bereits auf dem final zugeordneten Lagerplatz (vgl. Abbildung 34). Daher sind keine weiteren Anforderungen aus den Prozessen der BPMN-Diagramme für die selbststeuernde Flächenzuordnung zu berücksichtigen.

Anders verhält es sich für die selbststeuernde Zuordnung von Verkehrsmitteln zu Ausgangspunkten (Kaje, Gleisrampe oder Lkw-Bucht). Sofern die bereits beschriebenen technischen Anforderungen erfüllt sind, kann auch für diese Prozesse grundsätzlich eine selbststeuernde Zuordnung umgesetzt werden. Auch hier sind, wie bei den anderen Prozessen, die entsprechenden Gruppierungseigenschaften für die Verkehrsmittel zu wählen. Für wasserseitige Verkehrsmittel können, wie in der Analyse unter 6.1.7 und 6.2.3, die anzulaufenden Destinationen als Kriterium verwendet werden. Dennoch sind auch hier weitere Unterscheidungskriterien für eine weitere Ausgestaltung denkbar. Beispielsweise könnte eine zusätzliche Differenzierung nach Herstellern und Reedern sinnvoll sein (für den Fall, dass gewisse Hersteller Rahmenverträge mit vordefinierten Reedern haben und nur durch diese transportiert werden dürfen).

---

Die in der Evaluation verwendete Grundlogik kann auch für die Verkehrsmittel Bahn und Lkw verwendet werden. Eine Gruppierung auf Grundlage der Transportdestinationen bietet sich auch für diese Verkehrsmittel an, da zu erwarten ist, dass die betreffenden Fahrzeuge durch die selbststeuernde Flächenzuordnung räumlich in geringem Umkreis allokiert wurden.

## **7.2 Leitfaden für die Umsetzung**

Die vorstehenden Überlegungen zeigen, dass die Umsetzbarkeit der neuen Methodik den neuen Selbststeuerungsmethoden mit wenigen technischen und prozessualen Anforderungen verbunden ist. Damit eine Umsetzung im Umfeld eines Automobilterminals leichter ermöglicht werden kann, soll im Folgenden ein grundlegender Handlungsleitfaden für die Implementierung an einem Automobilterminal abgeleitet werden. Wie der Aufbau dieser Arbeit folgt dieser Leitfaden methodisch dem allgemeinen SE-Vorgehensmodell und ist in die sechs Schritte (Vorstudie, Hauptstudie, Detailuntersuchungen, Systembau, Systemeinführung und Abschluss) unterteilt.

### **7.2.1 Auswahl der Prozesse und Anforderungsabgleich (Vorstudie)**

In der Vorstudie wird in einem ersten Schritt festgelegt, ob alle Prozesse umgestellt werden sollen, oder ob eine partielle Einführung erfolgen soll. Insbesondere bei teilweisen Einfügungen sollte im Rahmen der Vorstudie geprüft werden, ob die ausgewählten Prozesse entsprechendes Potenzial aufweisen. Bei dieser Potenzialbeurteilung sollten speziell die Prozesshäufigkeit und die in der Vergangenheit aufgetretene Volatilität (Volumen, Lieferzeitfenster, Standtage) berücksichtigt werden. Für die Auswahl können entsprechende Mengen- oder Sankeydiagramme verwendet werden. Auch könnten statistische Auswertungen wie XY-Diagramme und Streu-Plots verwendet werden, um die Prozesse hinsichtlich der Volumina und ihrer Volatilität zu bewerten.

Nach der Auswahl der Prozesse sind für jeden Prozess die beschriebenen technischen Anforderungen zu überprüfen. Primär ist zu klären, ob die benötigten Datenstrukturen bereits vorhanden sind oder noch aufgebaut werden müssen. Sinnvollerweise werden die ausgewählten Prozesse in diesem Schritt systematisch modelliert und analysiert. Für die Prozessanalyse können beispielsweise BPMN 2.0 Diagramme oder EPK-Diagramme verwendet werden. Auf dieser Basis können die prozessualen und datentechnischen Anforderungen abgeglichen werden. Etwaiger Anpassungsbedarf, beispielsweise in dem Terminal-IT-System oder in den Prozess-Abläufen selbst können so schnell erkannt und als Sollzustand dokumentiert werden.

---

## 7.2.2 Prozessausgestaltung und Umsetzungsprojektierung (Hauptstudie)

Auf dieser Grundlage kann die konzeptionelle Ausgestaltung der Prozesse und die Projektierung Umsetzung erfolgen. Die Prozessgestaltung fokussiert hierbei vornehmlich die initiale Definition von Fahrzeug- und Verkehrsmittelgruppen für die ausgewählten Prozesse. Ausgehend von den Volumenanalysen aus der Vorstudie sollten in diesem Schritt sinnvolle Gruppenkonfigurationen abgeleitet und dokumentiert werden. Neben einer analytischen Ausarbeitung der Fahrzeuggruppen auf der Grundlage der bekannten Daten, ist eine Absicherung der Ergebnisse der Gruppierungseigenschaften, beispielsweise durch Workshops mit den planungsverantwortlichen Mitarbeitern zielführend. Hierdurch kann sichergestellt werden, dass ggf. existierende Besonderheiten in den Prozessen (z.B. spezielle Kunden-Reeder-Beziehungen) bei der Gruppenbildung berücksichtigt werden.

Im Zuge der Umsetzungsprojektierung sind drei wesentliche Aufgaben zu adressieren. In einem ersten Schritt sollten, im Rahmen eines klassischen Software-Projektmanagements, alle Arbeitsumfänge, welche zusätzlich entwickelt oder angepasst werden müssen, geplant und terminiert werden. Hierzu bieten sich die klassischen Methoden und Werkzeuge des Software-Engineering an (u.a. Projekt-, Netz oder Balkenpläne, agile Sprintpläne). Eine weitere wichtige Aufgabe ist die Definition von prozessualen-Schnittstellen und die Gestaltung des übergreifenden Zusammenwirkens der einzelnen Planungsaufgaben (analog zu den Überlegungen in Abbildung 78). Insbesondere ist in diesem Schritt ein Sollprozess für den konkreten Fall abzuleiten, welcher beschreibt, wie die Aufgaben zusammenwirken sollen, wann und von welchen Akteuren welche Aufgaben (z.B. anpassen der zugrundeliegenden Gruppenzuordnungen) durchgeführt werden sollen. Für die Beschreibung bieten sich sowohl Prozess und Ablaufdiagramme (u.a. BPMN 2.0 oder EPK-Diagramme) und auch Strukturdiagramme (z.B. Organigramm) an.

## 7.2.3 Parametrisierung und Kalibrierung (Detailstudien)

Nachdem die Projektierung und organisatorischen Rahmenbedingungen dokumentiert wurden, bestimmte Prozesse ausgewählt und erste grobe Umsetzungsparameter in Form von Gruppenzuordnungen für Fahrzeuge und Verkehrsmittel definiert wurden, wird die Feingestaltung der Selbststeuerungsmethoden in der Phase der Detailstudien vorgenommen. Ziel dieser Phase ist eine möglichst gute (im Sinne der gewünschten logistischen Zielerreichung) Parametrisierung der Steuerung einzustellen. In diesem Schritt werden die Gewichtungsfaktoren der Pheromonwertberechnung sowie die Evaporationskonstanten ermittelt und festgelegt. Hierfür kann ähnlich wie in dieser Arbeit vorgegangen und verschiedene Konfigurationen mittels Simulation überprüft werden. Für die Evaluation der Faktorwirkungen in dem zu betrachtenden System können Methoden wie die Voll- oder



---

Teilfaktorielle-Versuchsplanung oder die Taugchi-Methode zur Sensitivitätsanalyse genutzt werden.

Ausgehend von einer gefundenen performanten Basiskonfiguration können weitere Optimierungsschritte vorgenommen werden. Denkbar sind hier die Anwendung von bestehenden Metaheuristiken (z.B. Simulated Annealing, Tabu-Search oder genetische Algorithmen) in Kombination mit einem Simulationsmodell, um die Ergebnisse zusätzlich zu verbessern. Bei diesen Ansätzen werden die bestehenden Parameterkombinationen als Nachbarschaft aufgefasst, entsprechend von vorgegebenen Verfahrensregeln permutiert und anschließend durch einen Simulationslauf bewertet.

#### 7.2.4 Entwicklung der Softwareelemente (Systembau)

In der Phase des Systembaus erfolgt die Software-Entwicklung der in der Hauptstudie projektierten Inhalte. Neben den softwaretechnischen Umsetzungen können hier in dieser Phase auch die identifizierten notwendigen Prozessveränderungen vorgenommen werden. Hierzu zählt insbesondere die Erstellung von Arbeits- und Handlungsanweisungen. Auch sollten in diesem Schritt die erforderlichen Schulungsunterlagen erstellt werden. Die geplanten Schulungen sollten nicht nur das operative Fahrpersonal adressieren, sondern auch die Mitarbeitenden in allen beteiligten Planungsabteilungen. Die Arbeitsaufgaben dieses Personenkreises werden sich, wie die Abbildung 78 zeigt, entsprechend verändern. So wird nach einer Umsetzung ein stärkerer Fokus dieser Mitarbeiter auf das Monitoring und die Parametrisierung der Steuerung liegen.

#### 7.2.5 Roll-Out (Systemeinführung)

In der Roll-Out-Phase sollte die eigentliche Umsetzung erfolgen. Nach dem alle Mitarbeiter geschult wurden, können die neuen Prozesse aktiviert werden. Nach einer entsprechenden Test- und Erprobungsphase werden die Prozesse wie geplant umgestellt. In dieser Phase sollten sowohl die Systemperformance als auch mögliche Fehlfunktionen genau dokumentiert und analysiert werden. Erkannte Änderungsmaßnahmen werden in der Optimierungsphase vorgenommen.

#### 7.2.6 Optimierung (Abschluss)

Die Optimierungsphase zielt in einem ersten Schritt auf die Stabilisierung der umgesetzten Prozesse. Auf der Grundlage der Fehlerdokumentationen werden Anpassungsbedarfe identifiziert und umgesetzt. Nach der Prozessstabilisierung können die bestehenden Analysemethoden und -modelle verwendet werden, um die Parameter der neuen Steuerung anzupassen und zu verbessern. Denkbar ist in der Optimierungsphase eine zyklisch

wiederkehrende Anwendung der metaheuristischen Prozesssimulationen aus dem Parametrisierungsschritt, um die Steuerung bestmöglich an die aktuelle Situation anzupassen.

### 7.3 Potenziale und Herausforderungen der Methodik im Praxiseinsatz

Die Detailanalysen und die Betrachtungen zu einer möglichen systemischen Umsetzung zeigen, dass die neue Planungsmethodik auf Basis pheromonbasierter selbststeuernder Prozesse zahlreiche Verbesserungspotenziale gegenüber der aktuellen Situation birgt. Um das explorative Ziel dieser Arbeit abzuschließen, sollen in einer finalen Betrachtung die Potenziale und die Grenzen der neuen Methodik detailliert betrachtet werden. Zu diesem Zweck fasst die Tabelle 16 die Betrachtungsbereiche der vorangegangenen Analysen zusammen und nimmt eine Potenzialbewertung der relevanten Teilaspekte vor.

**Tabelle 16: Potenzialbetrachtung der neuen Planungsmethodik**

Betrachtungsbereich	Aspekt	Potenzialbewertung
Anforderungen aus Problemanalyse	Leistungsfähigkeit Flächenallokation	++
	Leistungsfähigkeit Verkehrsträgerallokation	+
	Leistungsfähigkeit integrierter Ansatz	++
	Handhabung von Dynamik und Unsicherheit	++
	Prognostizierbarkeit	--
Umsetzbarkeit in Terminals	Implementierbarkeit in bestehende Systeme	+
	Gestaltung und Anpassbarkeit	++
	Erweiterbarkeit	++
	Anwendbarkeit auf generelle Lagerallokation	++
	Anwendbarkeit auf generelle Technikallokation	++
	Anwendbarkeit auf generelle Verkehrsträgerallokation	++
	Anforderungen an IT-Infrastruktur	O
Betrieb in Terminals	Durchführung der Planungsaufgaben	++
	Komplexität der Planung	++
	Aufwand für Prozessgestaltung	+
	Zusätzliche Anforderungen aus operativen Prozessen	O
	Akzeptanz der Mitarbeiter	+
	Akzeptanz des Managements	--

++ sehr hoch  
 + hoch  
 O neutral  
 - gering  
 -- sehr gering

Die Leistungsfähigkeit neuer Methodik wurde in den Detailstudien zum generischen Terminalmodell und anhand des realen Fallbeispiels intensiv analysiert. Hierbei zeigten die Analysen, dass die neuen Ansätze grundsätzlich ein hohes Potenzial zur Verbesserung der Terminalleistungsfähigkeit haben. Hierbei haben die Analysen gezeigt, dass insbesondere dem kombinierten Einsatz von Flächen- und Verkehrsmittelallokationen zu einer Leistungssteigerung in allen betrachteten KPIs führt. Weiterhin zeigten die Detailstudien bei der Untersuchung des Einflusses von dynamischen Rahmenbedingungen und struktureller

---

Komplexität, dass die neue Methodik unter diesen Bedingungen zu verbesserter logistischer Leistung führt.

Daher wird das Potenzial hinsichtlich des Umgangs mit Dynamik und Komplexität als besonders hoch eingeschätzt. Allerdings gehen diese Potenziale zulasten der Prognostizierbarkeit. Üblicherweise können als Ergebnis des klassischen Planungsprozesses Flächenbelegungs- oder Flächenmasterpläne (statische Zuordnungen von Fahrzeuggruppen zu Terminalbereichen) mit einer gewissen temporären Gültigkeit erstellt werden. Eine derartige Prognostizierbarkeit für Flächenbelegungen wird durch die Nutzung selbststeuernder Prozesse konzeptionell ausgeschlossen.

Hinsichtlich der Implementierbarkeit wird das Potenzial neuer Methodik als hoch eingestuft. Hierbei ist der Aufwand der Implementierung abhängig von der Terminalkonfiguration (Prozesse und IT-Landschaft) vor einer Umsetzung. So kann eine Umsetzung mit weniger Aufwand verbunden sein, falls bereits eine durchgängige IT-technische Erfassung aller Bewegungen gegeben ist. Dennoch ist davon auszugehen, dass Umsetzungsumfänge durchzuführen sind. Der entwickelte Handlungsleitfaden kann für die schrittweise Umsetzung herangezogen werden. Da unter Beachtung des Leitfadens die Umsetzungsschritte und -umfänge bereits klar umrissen sind, wird das Potenzial der Umsetzbarkeit als hoch bewertet. Als wesentlicher Bestandteil des Leitfadens wurde die Anpassungsfähigkeit der Selbststeuerungsmethoden adressiert. Wie bereits beschrieben, kann die Leistung der Selbststeuerungsmethoden gut mittels der Gewichtungparameter und der Evaporationskonstanten eingestellt werden. Dank der vollfaktoriellen Analyse an dem generischen Modell und an dem realen Terminalbeispiel konnte die Wirksamkeit der einzelnen Parameter auf die KPIs nachgewiesen werden. Für eine leistungsstarke Implementierung in ein existierendes Terminal könnten, wie im Leitfaden vorgeschlagen, zudem metaheuristische Ansätze genutzt werden, um die zusätzlichen Potenziale nutzbar zu machen. Daher wird das Potenzial hinsichtlich der Anpassbarkeit als hoch eingeschätzt.

Unter dem Kriterium Erweiterbarkeit ist die Erweiterung des Ansatzes auf zusätzliche KPIs und mögliche andere relevante Aspekte der Allokationsentscheidungen zu verstehen. Die Erweiterbarkeit der Methodik ist grundsätzlich als sehr hoch zu bewerten. Die Möglichkeit zur beliebigen Erwartung ist der Lösung inhärent. Dies wird bei näherer Betrachtung der zugrundeliegenden Pheromonwertgleichungen (Gleichung (8) und Gleichung (9)) deutlich. Die Gleichung (8) für die Flächenallokation ist additiv, mit eigenen Gewichtungsfaktoren aufgebaut. Ergänzungen weiterer Aspekte für die Auswahl von Lagerreihen können durch Hinzufügen weiterer Terme ohne Weiteres vorgenommen werden. Sofern die hinzugefügten Terme ebenfalls Gewichtungsfaktoren aufweisen, können auch die Erweiterungen

---

entsprechend parametrisiert werden. In gleicher Weise sind auch Erweiterungen für die Gleichung (9) der Verkehrsmittelallokation denkbar. In der aktuellen Definition umfasst diese Gleichung lediglich einen Term. Aber auch für diese Gleichung ist eine additive Verknüpfung mit weiteren Termen ohne weiteres möglich. Daher wird das Potenzial der Erweiterbarkeit als besonders hoch eingestuft.

Die Analysen hinsichtlich der Anwendbarkeit und der Anforderungen aus den Prozessen des Beispielterminals haben gezeigt, dass die neue Selbststeuerungsmethode für beliebige Lagerallokationsfragestellungen anwendbar ist. Auch für den Einsatz bei den Allokationsfragen im Kontext von Technikprozessen wurden keine Einschränkungen erkannt. Die Anwendbarkeit auf die unterschiedlichen Verkehrsmittelallokationsprozesse wurde ebenfalls bestätigt. Daher wird das Umsetzungspotenzial für alle Terminalprozesse als hoch angesehen.

Wie unter 7.1.2 beschrieben, weichen die technischen Anforderungen nicht von dem Stand der Technik der heutigen Terminals ab. Zwar bestehen klare technische Anforderungen, allerdings gehen diese nicht über die zu erwartende technische Ausstattung von Terminals hinaus. Daher wird das Umsetzungspotenzial als neutral betrachtet. Die benötigte technische Ausstattung stellt keine besondere Grenze für die neuen Ansätze dar.

Für den Betrieb nach der Umsetzung resultieren weitere Potenziale, welche ein Terminal durch eine Implementierung nutzbar machen kann. Durch den Wegfall elementarer Planungsaufgaben des kaskadierten klassischen Planungsprozesses wird der Arbeitsaufwand und -umfang für die Planungsprozesse nach der Einführung drastisch reduziert. Die planenden Mitarbeiter können die verbleibenden Personalplanungsaufgaben zeitlich schneller bearbeiten und die freiwerdenden Kapazitäten für andere Aufgaben, wie beispielsweise die im Handlungsleitfaden vorgeschlagene Systemoptimierung, nutzen. Daher wird das Potenzial für diesen Aspekt hoch eingestuft. Auch die Komplexität der Planung kann durch eine Umsetzung verringert werden. Da die Interdependenzen zwischen den kaskadierten Planungsschritten aufgelöst und auf die selbststeuernde Prozessausführung verlagert werden, besitzen die verbleibenden Planungsaufgaben weniger Verknüpfungen zu weiteren Planungsgegenständen.

Hinsichtlich der Gestaltung der operativen Prozesse fordern die neuen Ansätze keine besonderen Umstellungen der bereits implementierten Verfahrensprozesse. Die neue Steuerung kann grundsätzlich in operative Prozesse eingeführt werden. Anpassungen an den Prozessen sind lediglich vorzunehmen, sofern die Prozesse die technischen Rahmenbedingungen noch nicht vollständig erfüllen (z.B. bei fehlender digitaler Erfassung der Fahrbewegungen). Trotz der leichten möglichen Umsetzungsaufwände wird das Potenzial als hoch eingestuft.

---

Bei der Analyse der Anforderungen für die Implementierung wurde bereits erkannt, dass ggf. zusätzliche Anforderungen für eine Umsetzung bestehen können. So können zusätzliche Anpassungen bei der Flächenauswahl notwendig sein, falls die Auftragsbearbeitung in der Umsetzung weiterhin auf Ebene von Bussen und nicht von individuellen Fahraufträgen erfolgt. In diesem Fall sollte die Allokationsentscheidung für die Fahrzeuge der Mitarbeitenden aus einem Bus identisch sein, damit die Busabholung effizient erfolgen kann. Derartige zusätzliche Anpassungen sind konzeptionell problemlos möglich. Sie steigern allerdings die Komplexität der Anwendung. Daher sind derartige weitere Anpassungen eher als neutral oder als leichtes Hemmnis für eine Umsetzungsentscheidung zu sehen.

Aus arbeitspsychologischer Sicht stellen Prozessveränderungen und damit verbunden die Akzeptanz der Mitarbeitenden einen begrenzenden Risikofaktor für neue Lösungen dar. Aus Sicht der operativ Mitarbeitenden Personen ist dieser Aspekt eher als Potenzial zu verstehen. Im Idealfall bleiben die operativen Prozesse unverändert, sodass keine Änderung für die Mitarbeitenden erfahrbar wird. Sollten Prozessänderungen aufgrund der technischen Anforderungen notwendig (z.B. digitale Erfassung von Fahrbewegungen) sein, so können diese mit den klassischen Methoden eines technischen Changemanagements begleitet werden.

Die Lösungsakzeptanz bei den planenden Mitarbeitern und auf der Managementebene stellt hierzu im Vergleich ein deutlich größeres Risiko dar. Zum einen verändern sich Arbeitsprozesse in der Planung grundsätzlich. Elementare Aufgaben der Mitarbeiter werden in dem neuen System nun auf die implementierte Selbststeuerung transferiert. Diese massive Umgestaltung von Arbeitsprozessen birgt die Gefahr, dass die neuen Prozesse durch die Mitarbeitenden nicht akzeptiert werden. Neben diesem organisatorischen Risiko bestehen weitere inhaltliche Akzeptanzrisiken. Die neue Methodik übernimmt elementare Planungsfunktionen und determiniert somit die logistische Systemleistung. Durch die der Selbststeuerung inhärente Dynamik in den Allokationsentscheidungen fehlt das bis dahin bekannte prognostizierbare Verhalten der Planung (u.a. starre Zuordnungspläne). Die Dynamik der selbststeuernden Entscheidungen und mangelnde langfristige Prognostizierbarkeit des Systemverhaltens kann seitens der Planer und auch durch die Managementebenen als Intransparenz aufgefasst werden. Daher wird dieser Aspekt als relevantes Umsetzungsrisiko gewertet.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass die Potenziale der neuen Planungsmethodik auf Basis selbststeuernder Prozesse die möglichen begrenzenden Risiken überwiegen. Keiner der Aspekte steht einer partiellen oder vollständigen Umsetzung entgegen. Insgesamt ist eine Implementierung realistisch umsetzbar. Hierbei ist, wie im Leitfaden vorgesehen, eine

---

detaillierte Projektierung und Planung der Aktivitäten unabdingbar. Besonders scheint ein umfangreiches Changemanagement, welches sowohl die operativen, aber vor allem die planenden Mitarbeitenden und das Management einbezieht, von zentraler Bedeutung, um die Umsetzungsrisiken zu minimieren.

## **8. Schlussbetrachtungen**

Diese Arbeit hat gezeigt, dass die neue integrierte Planungsmethodik auf Basis pheromonbasierter selbststeuernder Prozesse für Automobilterminals große Verbesserungspotenziale birgt und dazu beitragen kann, die inhärenten Schwachstellen des klassischen kaskadierten Terminalplanungsprozesses zu überwinden. Im Folgenden sollen die Ergebnisse dieser Arbeit zusammengefasst und in Bezug zu der forschungsleitenden Ausgangsfragestellung gesetzt werden. Hierauf aufbauend wird die praxeologische Relevanz der Ergebnisse zusammengefasst und ein Ausblick für weitere Forschungsfragen im Kontext des neuen Selbststeuerungsansatzes gegeben.

### **8.1 Zusammenfassung**

Auf der Basis von zwei forschungsleitenden Hypothesen wurde das übergeordnete Ziel dieser Arbeit, die Entwicklung einer neuen Planungsmethodik auf Basis von selbststeuernden logistischen Prozessen für Automobilterminals, abgeleitet. Um dieses Ziel zu erreichen, wurden verschiedene Teilziele formuliert, welche sukzessive durch ein an der SE-Logik angelehntes Vorgehen untersucht wurden. Zunächst wurde im Rahmen einer Vorstudie das deskriptive Ziel dieser Arbeit verfolgt. Neben der definitorischen Auseinandersetzung mit relevanten Begriffen für diese Arbeit wurde der Planungsprozess von Autoterminals in den Kapiteln 1 und 2 detailliert betrachtet. Hierbei wurden neben der Untersuchung des Stands der Technik die forschungsleitenden Hypothesen kritisch überprüft. Durch die detaillierte Analyse der theoretischen Zusammenhänge konnten beide Basishypothesen bestätigt werden. Durch die Bestätigung der Basishypothesen und der Identifikation von selbststeuernden logistischen Prozessen als potenziellen Lösungsansatz konnte das deskriptive Ziel dieser Arbeit erreicht und die Vorstudienphase abgeschlossen werden.

Auf der Grundlage dieser Erkenntnis wurde im Zuge der Hauptstudie das praktische Ziel dieser Arbeit verfolgt. Hierfür wurden die identifizierten Terminalprozesse in Kapitel 3 mit den existierenden Prozessen eines Beispielterminals verglichen und verfeinert. Im Zuge der Prozessmodellierung und -analyse wurden zunächst die in Kapitel 2 vermuteten Wirkzusammenhänge zwischen den Prozessen und den Planungsaktivitäten detailliert und abgesichert. Auf dieser Grundlage wurden die bestehenden Terminalprozesse dekomponiert und möglichen Lösungsalternativen in Kapitel 4 zugänglich gemacht. Durch einen

---

methodischen Vergleich von bestehenden Selbststeuerungsverfahren wurden pheromonbasierte Selbststeuerungsansätze als besonders aussichtsreiche Methodengruppe identifiziert. In einem nächsten Schritt wurde ein Vorgehensmodell für die Synthese neuer Selbststeuerungsmethoden auf den Problembereich angewendet und eine neue Planungsmethodik auf Basis selbststeuernder Prozesse entwickelt. Der Selbststeuerungsansatz auf der Ausführungsebene umfasst zwei Komponenten, welche einerseits eine selbststeuernde Flächenallokation von Fahrzeugen zu den Lagerorten und andererseits eine Zuordnung von Verkehrsmitteln zu Be- und Entladeorten erlauben. Durch die Entwicklung und die Dokumentation der neuen Planungsmethodik auf Basis einer pheromonbasierten Selbststeuerung für Automobilterminals in Kapitel 5 wurde das praktische Ziel dieser Arbeit erreicht.

Die Leistungsfähigkeit der neuen Methodik wurde in der Phase der Detailstudien untersucht, um das evaluative Ziel dieser Arbeit zu erreichen. Die Untersuchungen sollten zeigen, ob die neue Methodik in der Lage ist, die in den forschungsleitenden Hypothesen formulierten Schwachstellen des konventionellen Planungsprozesses zu überwinden. Um eine systematische Evaluation zu ermöglichen, wurden ein Hypothesensystem für die Evaluation mit fünf Hypothesen aufgebaut. Zunächst wurde die Methodenperformance und die Leistungsfähigkeit unter dynamischen und komplexen Rahmenbedingungen mittels eines generischen Terminalmodells simulativ untersucht. Die Analyse zeigte, dass die neuen Methoden grundsätzlich zu einer gesteigerten Leistung führen. Mit zunehmender Komplexität und Dynamik wurde diese Leistungsverbesserung noch verbessert. Weiterhin zeigten die Untersuchungen an dem generischen Modell, dass die Wechselwirkungen der Parameter auf die gewählten Leistungsindikatoren, wie konzeptionell geplant, wirken. Ausgehend von diesen Erkenntnissen wurde evaluativ überprüft, ob die neue Methodik auf realistische Szenarien anwendbar ist. Zu diesem Zweck wurde ein validiertes Simulationsmodell des Beispielterminals in Bremerhaven verwendet. Die neuen Methoden wurden implementiert und mit der ursprünglichen Leistung verglichen. Die Analyse zeigte, dass auch in dem realistischen Szenario die neuen Methoden zu einer verbesserten Leistung führen. Abschließend wurde auch in dem realdatenbasierten Modell eine vollfaktorielle Untersuchung durchgeführt und nachgewiesen, dass die Wechselwirkungen zwischen den Methodenparametern und den Leistungsindikatoren, wie konzeptionell geplant, beobachtet wurden. Durch die Bestätigung der fünf Evaluationshypothesen konnte das evaluative Ziel dieser Arbeit erfolgreich erreicht werden.

Auf der Grundlage des Nachweises der Funktionsfähigkeit der neuen Methodik wurde abschließend der Systembau adressiert. Hierdurch sollte das explorative Ziel dieser Arbeit, die Überprüfung der Relevanz des Ansatzes und die mögliche Übertragbarkeit auf reale

---

Terminalsysteme untersucht werden. Hierzu leitete das Kapitel 7 zunächst relevante technische und prozessuale Anforderungen ab und verglich diese mit dem Terminalbeispiel Bremerhaven. Anschließend wurden die Erkenntnisse hinsichtlich der Anforderungen und der Verknüpfung mit den verbleibenden Planungsprozessen zu einem Handlungsleitfaden für eine Implementierung auf Autoterminals entwickelt. In einem letzten Schritt wurden die Potenziale und die Grenzen der neuen Methodik untersucht. Die Implementierungspotenziale sind trotz der identifizierten Umsetzungsrisiken aufgrund der geringen technischen Hürden und der deutlich verbesserten logistischen Leistungsfähigkeit sehr hoch. Durch diese Betrachtung wurde auch das explorative Ziel dieser Arbeit erfolgreich erreicht.

## **8.2 Implikationen für die Nutzung in der Praxis**

Wie bereits dargelegt, ist das Potenzial der neuen Methodik für den Einsatz in Automobilterminals als hoch anzusehen. Die Methodik kann die sachlogischen Abhängigkeiten des klassischen kaskadierten Planungsprozesses auflösen und adressiert damit sowohl ein zentrales Problem der Terminals selbst als auch das der Rolle von Terminals in der automobilen Supply Chain. Die Methodik auf Basis selbststeuernder logistischer Prozesse ist daher nicht nur durch die nachgewiesene Leistungsfähigkeit relevant für die praktische Umsetzung. Sie hilft weiterhin, die logistische Leistungsfähigkeit und die Resilienz gegenüber externen Dynamiken von Terminals als Knotenpunkt der Supply Chains zu verbessern. Ein weiterer Aspekt, welcher die Relevanz dieser Methodik unterstreicht, ist die leichte Umsetzbarkeit und Skalierbarkeit. Terminals können im Zuge von Implementierungsprojekten problemlos zunächst kleinere Prozesse umstellen und erst anschließend die Umsetzung schrittweise skalieren. Hierbei sind die prozessualen und technischen Anforderungen so gering, dass sie bereits durch die Terminals ohnehin erfüllt werden. Infolgedessen sind die Implementierungsaufwände für Terminals eher gering. Durch das Zusammenwirken von hohen Leistungspotenzialen und die geringen Hürden für eine Umsetzung ist eine hohe Relevanz und ein hohes Nutzungspotenzial für die Praxis zu erwarten.

## **8.3 Ausblick**

Ausgehend von dem hohen Potenzial der neuen Planungsmethodik auf Basis selbststeuernder Prozesse scheinen weitere Arbeiten in diesem Bereich aussichtsreich. Ein mögliches Untersuchungsfeld liegt in der Weiterentwicklung der pheromonbasierten Methoden, indem systematisch weitere logistische Aspekte in die Pheromonfunktion integriert werden. Hierbei bestehen vielfältige Erweiterungsmöglichkeiten sowohl bei dem Ansatz zu Lagerallokation als auch bei der selbststeuernden Verkehrsmittelallokation. Neben einer gezielten kontextbasierten Methodenentwicklung könnte auch die Untersuchung von



---

automatisierten Verfahren, wie beispielsweise der genetischen Programmierung, für die systematische Erforschung von Methodenerweiterungen sein. Auch die Optimierung der Parameter, wie in dem Handlungsleitfaden vorgeschlagen, ist ein interessantes zukünftiges Handlungsfeld. Die Bereitstellung eines geeigneten systematischen Frameworks für die gezielte Parameteroptimierung kann dazu beitragen, die Leistungsfähigkeit des Ansatzes zu steigern. Auch für den späteren Betrieb der selbststeuernden Prozesse ist die Frage zu klären, wie und zu welchen Zeitpunkten die Parametrisierung der Steuerung anzupassen ist. Ein weiteres Forschungsfeld ist die Untersuchung der Übertragbarkeit weiterer Selbststeuerungsstrategien (z.B. Bienenalgorithmen) in die neue Planungsmethodik oder die Entwicklung neuer Selbststeuerungsmethoden für Automobilterminals. Die Bereitstellung eines systematischen Vergleichs könnte für die differenzierte Auswahl von passenden Steuerungsstrategien für unterschiedliche Terminals herangezogen werden. Ein weiteres interessantes Feld ist die detaillierte Ausarbeitung von Umsetzungsstrategien, welche ein dediziertes Changemanagement umfassen und die identifizierten Risiken der mangelnden Akzeptanz berücksichtigen.

---

## 9. Literaturverzeichnis

- Abel, D. (1990), *Petri-Netze für Ingenieure: Modellbildung und Analyse diskret gesteuerter Systeme*, 1. Auflage, Springer, Berlin; Heidelberg; New York; London; Paris; Tokyo; Hong Kong; Barcelona.
- Aguezoul, A. (2014), Third-party logistics selection problem: A literature review on criteria and methods, *Omega* 49, 69–78.
- Alkan, B., D.A. Vera, M. Ahmad, B. Ahmad und R. Harrison (2018), Complexity in manufacturing systems and its measures: a literature review, *European J. of Industrial Engineering* 12 (1), 116–150.
- Allweyer, T. (2016), *BPMN 2.0: Introduction to the Standard for Business Process Modelling*, 2. Auflage, Books on Demand, Norderstedt.
- Andersson, H., K. Fagerholt und K. Hobbesland (2015), Integrated maritime fleet deployment and speed optimization: Case study from RoRo shipping, *Computers & Operations Research* 55, 233–240.
- Armbruster, D., C. de Beer, M. Freitag, T. Jagalski und C. Ringhofer (2006), Autonomous control of production networks using a pheromone approach, *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 363 (1), 104–114.
- Automotive logistics (2020), Top 10 European FV ports, [https://automotivelogistics.h5mag.com/fvl\\_european\\_ports\\_2020/top\\_ten\\_ports](https://automotivelogistics.h5mag.com/fvl_european_ports_2020/top_ten_ports), abgerufen am 5.1.2022.
- Aytug, H., M.A. Lawley, K. McKay, S. Mohan und R. Uzsoy (2005), Executing production schedules in the face of uncertainties: A review and some future directions, *European Journal of Operational Research* 161 (1), 86–110.
- Baker, R.J. (2005), *CMOS circuit design, layout, and simulation*, IEEE Press series on microelectronic systems, 2. Auflage, IEEE Press, New York.
- Bala, B.K., F.M. Arshad und K.M. Noh (2017), *System Dynamics*, Springer Texts in Business and Economics, 1. Auflage, Springer Singapore, Singapore.
- Bangso, S. (2016), *Tecnomatix Plant Simulation: Modeling and Programming by Means of Examples*, 1. Auflage, Springer, Cham.
- Banks, J. (2005), *Discrete-event system simulation*, 4. Auflage, Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River.
- Beer, C. de (2008), *Untersuchung der Dynamik von selbststeuernden Prozessen in produktionslogistischen Systemen anhand ereignisdiskreter Simulationsmodelle*, Schriftenreihe: Informationstechnische Systeme und Organisation von Produktion und Logistik, Bd. 9, GITO-Verl, Berlin.
- Behnamian, J. und S.M.T. Fatemi Ghomi (2016), A survey of multi-factory scheduling, *Journal of Intelligent Manufacturing* 27 (1), 231–249.
- Beinke, T. und M. Görges (2012), Giganten in Bewegung, *Hebezeuge Fördermittel* 52 (9).
- Bergero, F. und E. Kofman (2011), PowerDEVS: a tool for hybrid system modeling and real-time simulation, *SIMULATION* 87 (1–2), 113–132.
- Bešković, B. und E. Twrđy (2011), Managing maritime automobile terminals: an approach toward decision-support model for higher productivity, *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering* 3 (4), 233–241.
- Bichou, K. (2009), *Port Operations, Planning and Logistics*, 1. Auflage, informa, London.
- Bichou, K. und R. Gray (2004), A logistics and supply chain management approach to port performance measurement, *Maritime Policy & Management* 31 (1), 47–67.
- Bierwirth, C. und F. Meisel (2015), A follow-up survey of berth allocation and quay crane scheduling problems in container terminals, *European Journal of Operational Research* 244 (3), 675–689.
- Bierwirth, C. und F. Meisel (2010), A survey of berth allocation and quay crane scheduling problems in container terminals, *European Journal of Operational Research* 202 (3), 615–627.
- BLG (2022), *BLG LOGISTICS GROUP AG & Co. KG: BLG - AutoTerminal Bremerhaven*, <https://www.blg-logistics.com/autoterminal-bremerhaven>, abgerufen am 2.1.2022.

- 
- BLG (2019), Luftbild AutoTerminal Bremerhaven, [https://www.blg-logistics.com/fileadmin/presse/Bilder\\_und\\_Logos/202106\\_autoterminal-bremerhaven-06.jpg.zip](https://www.blg-logistics.com/fileadmin/presse/Bilder_und_Logos/202106_autoterminal-bremerhaven-06.jpg.zip), abgerufen am 13.2.2023.
- BMWK (2023), Automobilindustrie, <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Textsammlungen/Branchenfokus/Industrie/branchenfokus-automobilindustrie.html>, abgerufen am 22.5.2023.
- Bonabeau, E., M. Dorigo und G. Theraulaz (1999), *Swarm intelligence: from natural to artificial systems*, 1. Auflage, Oxford University Press, New York.
- Böse, F. (2012), *Selbststeuerung in der Fahrzeuglogistik, Modellierung und Analyse Selbststeuernder Prozesse in der Automobillogistik*, GITO, Berlin.
- Böse, F., J. Piotrowski und B. Scholz-Reiter (2009), *Autonomously controlled Storage Management in Vehicle Logistics - Applications of RFID and Mobile Computing Systems*, *International Journal of RF Technologies: Research and Applications* 1 (1), 57–76.
- Böse, F. und K. Windt (2007), *Catalogue of Criteria for Autonomous Control in Logistics*, in: Hülsmann, M. und K. Windt (Hrsg.), *Understanding Autonomous Cooperation and Control in Logistics*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 57–72.
- Bose, S.K. (2002), *An Introduction to Queueing Systems*, Springer US, Boston, MA.
- Bossel, H. (2004), *Systeme, Dynamik, Simulation: Modellbildung, Analyse und Simulation komplexer Systeme*, 1. Auflage, Books on Demand, Norderstedt.
- van Brackel, T. (2009), *Adaptive Steuerung flexibler Werkstattfertigungssysteme*, Gabler.
- Brailsford, S.C., T. Eldabi, M. Kunc, N. Mustafee und A.F. Osorio (2019), *Hybrid simulation modelling in operational research: A state-of-the-art review*, *European Journal of Operational Research* 278 (3), 721–737.
- Brinkmann, B. (2005), *Seehäfen: Planung und Entwurf*, 1. Auflage, Springer, Berlin.
- Brosch, M. (2014), *Eine Methode zur Reduzierung der produktvarianteninduzierten Komplexität*, Hamburger Schriftenreihe Produktentwicklung und Konstruktionstechnik 7, 1. Auflage, TuTech Verl, Hamburg.
- Bruns, M. (1991), *Systemtechnik*, 1. Auflage, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- Bruzzone, A. et al. (2011), *Logistics node simulator as an enabler for supply chain development: innovative portainer simulator as the assessment tool for human factors in port cranes*, *SIMULATION* 87 (10), 857–874.
- Buhrkal, K., S. Zuglian, S. Ropke, J. Larsen und R. Lusby (2011), *Models for the discrete berth allocation problem: A computational comparison*, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 47 (4), 461–473.
- Bundesamt für Statistik (2019), *Güterverkehrsstatistik der Seeschifffahrt 2019*, [https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Transport-Verkehr/Gueterverkehr/Publikationen/Downloads-Schifffahrt/seeschifffahrt-jahr-2080500167004.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Transport-Verkehr/Gueterverkehr/Publikationen/Downloads-Schifffahrt/seeschifffahrt-jahr-2080500167004.pdf?__blob=publicationFile), abgerufen am 13.2.2023.
- Burduk, A. (2014), *Stability Analysis of the Production System Using Simulation Models*, in: Pawlewski, P. und A. Greenwood (Hrsg.), *Process Simulation and Optimization in Sustainable Logistics and Manufacturing*, Springer International Publishing, Cham, 69–83.
- Burger, A., A. Lang und Y. Müller (2017), *Mögliche Veränderungen von System-Architekturen im Bereich der Produktion*, in: Andelfinger, V.P. und T. Hänisch (Hrsg.), *Industrie 4.0*, Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 57–68.
- Carbone, V. und M.D. Martino (2003), *The changing role of ports in supply-chain management: an empirical analysis*, *Maritime Policy & Management* 30 (4), 305–320.
- Carteni, A. und S. de Luca (2012), *Tactical and strategic planning for a container terminal: Modelling issues within a discrete event simulation approach*, *Simulation Modelling Practice and Theory* 21 (1), 123–145.
- Chaari, T., S. Chaabane, N. Aissani und D. Trentesaux (2014), *Scheduling under uncertainty: Survey and research directions*, Konferenzpapier, 2014 International Conference on Advanced Logistics and Transport, ICALT, Hammamet.

- 
- Chang, D., Z. Jiang, W. Yan und J. He (2010), Integrating berth allocation and quay crane assignments, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 46 (6), 975–990.
- Chen, H., Q. Wang, G.R. Liu, Y. Wang und J. Sun (2016), Simulation of thermoelastic crack problems using singular edge-based smoothed finite element method, *International Journal of Mechanical Sciences* 115–116, 123–134.
- Chen, Y., K.W. Li, D. Marc Kilgour und K.W. Hipel (2008), A case-based distance model for multiple criteria ABC analysis, *Computers & Operations Research* 35 (3), 776–796.
- Cheng, C.-Y., T.-L. Chen und Y.-Y. Chen (2014), An analysis of the structural complexity of supply chain networks, *Applied Mathematical Modelling* 38 (9–10), 2328–2344.
- Christopher, M. und H. Peck (2004), Building the Resilient Supply Chain, *The International Journal of Logistics Management* 15 (2), 1–14.
- Cordeau, J.-F., G. Laporte, L. Moccia und G. Sorrentino (2011), Optimizing yard assignment in an automotive transshipment terminal, *European Journal of Operational Research* 215 (1), 149–160.
- Cosenz, F. und G. Noto (2016), Applying System Dynamics Modelling to Strategic Management: A Literature Review, *Systems Research and Behavioral Science* 33 (6), 703–741.
- Cox, D.R. und N. Reid (2000), *The Theory of the Design of Experiments*, 1. Auflage, Chapman and Hall/CRC.
- Czitrom, V. (1999), One-Factor-at-a-Time versus Designed Experiments, *The American Statistician* 53 (2), 126–131.
- Daganzo, C.F. (1990), The Productivity of Multipurpose Seaport Terminals, *Transportation Science* 24 (3), 205–216.
- Dashkovskiy, S., M. Görge und L. Naujok (2012), Autonomous control methods in logistics – A mathematical perspective, *Applied Mathematical Modelling* 36 (7), 2947–2960.
- Davahli, M.R., W. Karwowski und R. Tair (2020), A System Dynamics Simulation Applied to Healthcare: A Systematic Review, *International Journal of Environmental Research and Public Health* 17 (16), 5741.
- Dekkers, R. (2009), Distributed Manufacturing as co-evolutionary system, *International Journal of Production Research* 47 (8), 2031–2054.
- Delfmann, W. et al. (2011), Positionspapier zum Grundverständnis der Logistik als wissenschaftliche Disziplin, in: Wimmer, T. und T. Grosche (Hrsg.), *Flexibel – sicher – nachhaltig*, DVV Media Group GmbH, Hamburg, S. 262-274.
- Delfmann, W., M. ten Hompel und W. Kersten (2018), Logistics as a Science – Central Research Questions in the Era of the Fourth Industrial Revolution, *Logistics Research* 11 (9), 1–13.
- Dias, J.C.Q., J.M.F. Calado und M.C. Mendonça (2010), The role of European «ro-ro» port terminals in the automotive supply chain management, *Journal of Transport Geography* 18 (1), 116–124.
- Diehl, S. (2007), *Software Visualization*, 1. Auflage, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- Diesner, T. (2015), *Die Allgemeine Systemtheorie bei Ludwig von Bertalanffy: eine Begründung interdisziplinärer Wissenschaftspraxis*, Berliner Studien zur Wissenschaftsphilosophie & Humanontogenetik, Bd. 31, Logos-Verl, Berlin.
- DIN (1985), DIN 66261:1985-11. Informationsverarbeitung; Sinnbilder für Struktogramme nach Nassi-Shneiderman.
- DIN (1983), DIN 66001:1983-12. Informationsverarbeitung; Sinnbilder und ihre Anwendung.
- Dkhil, H., I. Diarrassouba, S. Benmansour und A. Yassine (2021), Modelling and solving a berth allocation problem in an automotive transshipment terminal, *Journal of the Operational Research Society* 72 (3), 580–593.
- Dolgui, A., D. Ivanov, S. Sethi und B. Sokolov (2018), Control theory applications to operations systems, supply chain management and Industry 4.0 networks, *IFAC-PapersOnLine* 51 (11), 1536–1541.
- Dorndorf, U. und J. Kneis (2014), Optimiertes Terminalmanagement in der Fahrzeugdistribution, in: Lübbecke, M., A. Weiler und B. Werners (Hrsg.),
-

- 
- Zukunftsperspektiven des Operations Research, Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 117–128.
- Dragović, B., E. Tzannatos und N.K. Park (2017), Simulation modelling in ports and container terminals: literature overview and analysis by research field, application area and tool, *Flexible Services and Manufacturing Journal* 29 (1), 4–34.
- Ducruet, C. (2017), Multilayer dynamics of complex spatial networks: The case of global maritime flows (1977–2008), *Journal of Transport Geography* 60, 47–58.
- Ducruet, C. (2013), Network diversity and maritime flows, *Journal of Transport Geography* 30, 77–88.
- Durakovic, B. (2017), Design of experiments application, concepts, examples: State of the art, *Periodicals of Engineering and Natural Sciences (PEN)* 5 (3), 421–434.
- Eley, M. (2012), *Simulation in der Logistik*, Springer-Lehrbuch, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- EIMaraghy, W., H. EIMaraghy, T. Tomiyama und L. Monostori (2012), Complexity in engineering design and manufacturing, *CIRP Annals* 61 (2), 793–814.
- Fischer, T. und H. Gehring (2006), Business Process Support in a Seaport Automobile Terminal — a Multi-Agent Based Approach, in: Chaib-draa, B. und J.P. Müller (Hrsg.), *Multiagent based Supply Chain Management, Studies in Computational Intelligence*, Bd. 28, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 373–394.
- Fischer, T. und H. Gehring (2005), Planning vehicle transshipment in a seaport automobile terminal using a multi-agent system, *European Journal of Operational Research* 166 (3), 726–740.
- Fishman, G.S. (2001), *Discrete-Event Simulation Modeling, Programming, and Analysis*, 1. Auflage, Springer New York, New York, NY.
- Fleischmann, B. (2008), Grundlagen: Begriff der Logistik, logistische Systeme und Prozesse, in: Dieter Arnold, H. Isermann, A. Kuhn, H. Tempelmeier und K. Furmans (Hrsg.), *Handbuch Logistik*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 3–34.
- Forrester, J.W. (2013), *Industrial dynamics*, Reprint of first ed. 1961 Auflage, Martino Publ, Mansfield Centre, Conn.
- Forrester, J.W. (2007), System dynamics—a personal view of the first fifty years, *System Dynamics Review* 23 (2–3), 345–358.
- Framinan, J.M. und R. Ruiz (2010), Architecture of manufacturing scheduling systems: Literature review and an integrated proposal, *European Journal of Operational Research* 205 (2), 237–246.
- Frank, M. (1999), Modellierung und Simulation - Terminologische Probleme, in: Biethahn, J., W. Hummeltenberg, B. Schmidt, P. Stähly und T. Witte (Hrsg.), *Simulation als betriebliche Entscheidungshilfe*, Physica-Verlag HD, Heidelberg, 50–64.
- Frazzon, E.M., J. Hartmann, T. Makuschewitz und B. Scholz-Reiter (2013), Towards Socio-Cyber-Physical Systems in Production Networks, *Procedia CIRP* 7, 49–54.
- Freitag, Michael., O. Herzog und B. Scholz-Reiter (2004), Selbststeuerung logistischer Prozesse - Ein Paradigmenwechsel und seine Grenzen, *Industrie Management* 20 (1), 23–27.
- Fu, M.C. (2002), Feature Article: Optimization for simulation: Theory vs. Practice, *INFORMS Journal on Computing* 14 (3), 192–215.
- Gelenbe, E. und G. Pujolle (1998), *Introduction to queueing networks*, 2. Auflage, Wiley, Chichester ; New York.
- Goren, S. und I. Sabuncuoglu (2008), Robustness and stability measures for scheduling: single-machine environment, *IIE Transactions* 40 (1), 66–83.
- Görges, M. und M. Freitag (2022), Design and Evaluation of an Integrated Autonomous Control Method for Automobile Terminals, *Logistics* 6 (4), 1–27.
- Görges, M. und M. Freitag (2020), On the Influence of Structural Complexity on Autonomously Controlled Automobile Terminal Processes, in: Freitag, M., H.-D. Haasis, H. Kotzab und J. Pannek (Hrsg.), *Dynamics in Logistics, Lecture Notes in Logistics*, Springer International Publishing, Cham, 42–51.
-

- 
- Görge, M. und M. Freitag (2019a), Dynamisierung von Planungsaufgaben auf Automobilterminals - Potenziale selbststeuernder logistischer Prozesse zur Flexibilisierung der Flächenmasterplanung., *Industrie 4.0 Management* 35 (1), 23–26.
- Görge, M. und M. Freitag (2019b), Modeling Autonomously Controlled Automobile Terminal Processes, Konferenzpapier, HICL, Hamburg.
- Grefen, K. und W. Strommer (2020), Die Auflösung der Automatisierungspyramide: Revolution der Art und Weise, wie Produkte morgen hergestellt und entwickelt werden, *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 115 (s1), 15–18.
- Grimme, C. und J. Bossek (2018), Grundbegriffe und Komplexität, in: Grimme, C. und J. Bossek (Hrsg.), *Einführung in die Optimierung*, Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 1–25.
- Grundstein, S. (2017), Fertigungsregelung flexibler Fließfertigungen und Werkstattfertigungen zur Einhaltung von Lieferterminen: Integration von Auftragsfreigabe, Arbeitsverteilung, Reihenfolgebildung und Kapazitätssteuerung unter Nutzung des Potenzials Cyber-Physischer Produktionssysteme, GRIN Verlag, München.
- Grundstein, S., S. Schukraft, B. Scholz-Reiter und M. Freitag (2015), Coupling order release methods with autonomous control methods – an assessment of potentials by literature review and discrete event simulation, *International Journal of Production Management and Engineering* 3 (1), 43–56.
- Gudehus, T. (2010), *Logistik*, 4. Auflage, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- Günther, H.-O. und H. Tempelmeier (2012), *Produktion und Logistik*, Springer-Lehrbuch, 9. Auflage, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- Günthner, W.A., S. Kessler, M. Mirlach und T. Frenz (2014), Forschungsbericht Optimierung von Entladestrategien bei der Schüttgut-Schiffsentladung, Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluß Logistik, Techn. Univ. München, Garching.
- Gutenberg, E. (1983), *Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre. 1: Die Produktion*, 24., unveränd. Auflage, Springer, Berlin Heidelberg.
- Gutenschwager, K., M. Rabe, S. Spieckermann und S. Wenzel (2017), Grundlagen der ereignisdiskreten Simulation, in: Gutenschwager, K., M. Rabe, S. Spieckermann und S. Wenzel, *Simulation in Produktion und Logistik*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 51–84.
- Guthrie, W.F. (2020), NIST/SEMATECH e-Handbook of Statistical Methods (NIST Handbook 151).
- Gyulai, D., A. Pfeiffer, B. Kádár und L. Monostori (2016), Simulation-based Production Planning and Execution Control for Reconfigurable Assembly Cells, *Procedia CIRP* 57, 445–450.
- Gyulai, D., A. Pfeiffer und L. Monostori (2017), Robust production planning and control for multi-stage systems with flexible final assembly lines, *International Journal of Production Research* 55 (13), 3657–3673.
- Haberfellner, R., O.L. De Weck, E. Fricke und S. Vössner (2015), *Systems engineering: Grundlagen und Anwendung*, 13., aktualisierte Auflage, Orell Füssli Verlag, Zürich.
- Halldorsson, A., H. Kotzab, J.H. Mikkola und T. Skjøtt-Larsen (2007), Complementary theories to supply chain management, *Supply Chain Management: An International Journal* 12 (4), 284–296.
- Han, Q.-L. (2002), Robust stability of uncertain delay-differential systems of neutral type, *Automatica* 38 (4), 719–723.
- Harland, C.M., R.C. Lamming, J. Zheng und T.E. Johnsen (2001), A Taxonomy of Supply Networks, *The Journal of Supply Chain Management* 37 (4), 21–27.
- Harvey, J.-P. und A.E. Gheribi (2014), Process Simulation and Control Optimization of a Blast Furnace Using Classical Thermodynamics Combined to a Direct Search Algorithm, *Metallurgical and Materials Transactions B* 45 (1), 307–327.
- Haubrich, H. (2017), Optimierung der Fahrzeugdistribution mit Software der INFORM GmbH, in: Göpfert, I., D. Braun und M. Schulz (Hrsg.), *Automobillogistik*, Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 287–304.

- 
- Helal, M. (2008), A Hybrid System Dynamics-discrete Event Simulation approach To Simulating The Manufacturing Enterprise.
- Heracleous, L. (1998), Strategic thinking or strategic planning?, *Long Range Planning* 31 (3), 481–487.
- Herdes, C., T.S. Totton und E.A. Müller (2015), Coarse grained force field for the molecular simulation of natural gases and condensates, *Fluid Phase Equilibria* 406, 91–100.
- Hoad, K. und M. Kunc (2018), Teaching system dynamics and discrete event simulation together: a case study, *Journal of the Operational Research Society* 69 (4), 517–527.
- Hoff-Hoffmeyer-Zlotnik, M. et al. (2020a), Gestaltung von Mensch-Technik-Schnittstellen für die Digitalisierung von Planungs- und Steuerungsprozessen auf Automobilterminals, in: Freitag, M. (Hrsg.), *Mensch-Technik-Interaktion in der digitalisierten Arbeitswelt*, Schriftenreihe der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Arbeits- und Betriebsorganisation (WGAB) e.V. (2020), GITO Verlag, 275–293.
- Hoff-Hoffmeyer-Zlotnik, M., S. Schukraft, D. Werthmann, S. Oelker und M. Freitag (2017), Interactive planning and control for finished vehicle logistics, Konferenzpapier, Hamburg International Conference of Logistics (HICL), Hamburg.
- Hoff-Hoffmeyer-Zlotnik, M., T. Sprodowski und M. Freitag (2020b), Revisiting order assignment problems in a real-case vehicle compound scenario, Konferenzpapier, 6th IEEE Congress on Information Science and Technology (CiSt), Agadir - Essaouira, 5. Juni.
- Hofmann, E. (2004), Betriebswirtschaftslehre als anwendungsorientierte Wissenschaftsdisziplin, in: Pfohl, H.-C. (Hrsg.), *Netzkompetenz in Supply Chains*, Gabler Verlag, Wiesbaden, 285–297.
- Hopp, W.J. und M.L. Spearman (2004), To Pull or Not to Pull: What Is the Question?, *Manufacturing & Service Operations Management* 6 (2), 133–148.
- Huber, T. (2014), „Global Ports“ in der maritimen Transportwirtschaft. Akteursbasierende Bewertung des weltweiten Netzwerks von Hafenstandorten.
- Huynh, T.H. (2013), Beitrag zur Systematisierung von Theorien in der Logistik, Schriftenreihe Logistik der Technischen Universität Berlin 24, Univ.-Verl. der TU, Berlin.
- Iannone, R., S. Miranda, L. Prisco, S. Riemma und D. Sarno (2016), Proposal for a flexible discrete event simulation model for assessing the daily operation decisions in a Ro-Ro terminal, *Simulation Modelling Practice and Theory* 61, 28–46.
- IMO (1974), International Convention for the Safety of Life at Sea (SOLAS).
- Jahangirian, M., T. Eldabi, A. Naseer, L.K. Stergioulas und T. Young (2010), Simulation in manufacturing and business: A review, *European Journal of Operational Research* 203 (1), 1–13.
- Jankovic, A., G. Chaudhary und F. Goia (2021), Designing the design of experiments (DOE) – An investigation on the influence of different factorial designs on the characterization of complex systems, *Energy and Buildings* 250, 1–17.
- Jeon, S.M. und G. Kim (2016), A survey of simulation modeling techniques in production planning and control (PPC), *Production Planning & Control* 27 (5), 360–377.
- Jin, Y. und J. Branke (2005), Evolutionary Optimization in Uncertain Environments—A Survey, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation* 9 (3), 303–317.
- Jin, Y. und B. Sendhoff (2003), Trade-Off between Performance and Robustness: An Evolutionary Multiobjective Approach, in: Goos, G. et al. (Hrsg.), *Evolutionary Multi-Criterion Optimization*, Lecture Notes in Computer Science, Bd. 2632, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 237–251.
- Josyula, S.P., J. Törnquist Krasemann und L. Lundberg (2018), A parallel algorithm for train rescheduling, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 95, 545–569.
- Karnon, J., J. Stahl, A. Brennan, J.J. Caro, J. Mar und J. Möller (2012), Modeling Using Discrete Event Simulation: A Report of the ISPOR-SMDM Modeling Good Research Practices Task Force—4, *Medical Decision Making* 32 (5), 701–711.
- Kasperska, E. und D. Słota (2004), The Estimation of the Mathematical Exactness of System Dynamics Method on the Base of Some Economic System, in: Kanade, T. et al. (Hrsg.), *Computational Science - ICCS 2004*, Lecture Notes in Computer Science, Bd. 3037, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 634–637.
-

- 
- Kim, A., H.-J. Park, J.-H. Park und S.-W. Cho (2021), Rescheduling Strategy for Berth Planning in Container Terminals: An Empirical Study from Korea, *Journal of Marine Science and Engineering* 9 (5), 527.
- Kirchhof, R. (2003), *Ganzheitliches Komplexitätsmanagement*, Deutscher Universitätsverlag, Wiesbaden.
- Klee, H. und A. Randal (2018), *Simulation of Dynamic Systems with MATLAB® and Simulink®*, 3. Auflage, CRC Press.
- Kleijnen, J.P.C. (1995), Verification and validation of simulation models, *European Journal of Operational Research* 82 (1), 145–162.
- Kordić, S., T. Davidović, N. Kovač und B. Dragović (2016), Combinatorial approach to exactly solving discrete and hybrid berth allocation problem, *Applied Mathematical Modelling* 40 (21–22), 8952–8973.
- Kotzab, H. (2000), Zum Wesen von supply chain management vor dem Hintergrund der betriebswirtschaftlichen Logistikkonzeption: Erweiterte Überlegungen., in: Wildemann, H. (Hrsg.), *Supply chain management*, TCW Transfer-Centrum, 21–48.
- Kovács, G. und K.M. Spens (2005), Abductive reasoning in logistics research, *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management* 35 (2), 132–144.
- Krallmann, H. (Hrsg.) (2007), *Systemanalyse im Unternehmen: prozessorientierte Methoden der Wirtschaftsinformatik*, 5., vollst. überarb. Auflage, Oldenbourg, München.
- Krishnaiah, K.K. und P. Shahabudeen (2012), *Applied Design of Experiments and Taguchi Methods*, PHI Learning Pvt. Ltd, New Dehli.
- Kühn, W. (2006), *Digitale Fabrik: Fabriksimulation für Produktionsplaner*, Hanser, München.
- Langner, P., C. Schneider und J. Wehler (1997), Prozeßmodellierung mit ereignisgesteuerten Prozeßketten (EPKs) und Petri-Netzen., *Wirtschaftsinformatik* 39, 479–489.
- Lanza, G. et al. (2019), Global production networks: Design and operation, *CIRP Annals* 68 (2), 823–841.
- Lanza, G., J. Stoll, N. Stricker, S. Peters und C. Lorenz (2013), Measuring Global Production Effectiveness, *Procedia CIRP* 7, 31–36.
- Larson, P.D. und A. Halldorsson (2004), Logistics versus supply chain management: An international survey, *International Journal of Logistics Research and Applications* 7 (1), 17–31.
- Law, A.M. (2017), A tutorial on design of experiments for simulation modeling, Konferenzpapier, 2017 Winter Simulation Conference (WSC), Las Vegas, NV, Dezember.
- Law, A.M. (2013), *Simulation modeling and analysis*, McGraw-Hill series in industrial engineering and management science, 5. Auflage, McGraw-Hill Education, Dubuque.
- Legato, P. und R.M. Mazza (2001), Berth planning and resources optimisation at a container terminal via discrete event simulation, *European Journal of Operational Research* 133 (3), 537–547.
- Leon, V.J., D.S. Wu und R.H. Storer (1994), Robustness measures and robust scheduling for job shops, *IIE Transactions* 26 (5), 32–43.
- Levien, R.B. und S.M. Tan (1993), Double pendulum: An experiment in chaos, *American Journal of Physics* 61 (11), 1038–1044.
- Lewin, M. und A. Fay (2018), Charakteristik intelligenter Objekte in einer digitalisierten Logistik, *Industrie 4.0 Management* 2018 (5), 21–24.
- Lin, S.-W., K.-C. Ying und S.-Y. Wan (2014), Minimizing the Total Service Time of Discrete Dynamic Berth Allocation Problem by an Iterated Greedy Heuristic, *The Scientific World Journal* 2014, 1–12.
- Lunze, J. und F. Lamnabhi-Lagarrigue (Hrsg.) (2009), *Handbook of hybrid systems control: theory, tools, applications*, Cambridge University Press, Cambridge, UK ; New York.
- Lv, X., J.G. Jin und H. Hu (2020), Berth allocation recovery for container transshipment terminals, *Maritime Policy & Management* 47 (4), 558–574.
- Ma, H.L., S.H. Chung, H.K. Chan und L. Cui (2019), An integrated model for berth and yard planning in container terminals with multi-continuous berth layout, *Annals of Operations Research* 273 (1–2), 409–431.
-



- 
- Mangan, J., C. Lalwani und B. Fynes (2008), Port-centric logistics, *The International Journal of Logistics Management* 19 (1), 29–41.
- Marasco, A. (2008), Third-party logistics: A literature review, *International Journal of Production Economics* 113 (1), 127–147.
- Martins, L., M.L.R. Varela, N.O. Fernandes, S. Carmo-Silva und J. Machado (2020), Literature review on autonomous production control methods, *Enterprise Information Systems* 14 (8), 1219–1231.
- Martins, L.M., N.O.G. Fernandes, M.L.R. Varela, L.M.S. Dias, G.A.B. Pereira und S.C. Silva (2020), Comparative study of autonomous production control methods using simulation, *Simulation Modelling Practice and Theory* 104, 1–14.
- März, L. und G. Weigert (2011), Simulationsgestützte Optimierung, in: März, L., W. Krug, O. Rose und G. Weigert (Hrsg.), *Simulation und Optimierung in Produktion und Logistik*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- Mason-Jones, R. und D.R. Towill (1999), Using the Information Decoupling Point to Improve Supply Chain Performance, *The International Journal of Logistics Management* 10 (2), 13–26.
- Mattfeld, D.C. (2006), The management of transshipment terminals: decision support for terminal operations in finished vehicle supply chains, *Operations research/computer science interfaces series, ORCS 35*, Springer Science+Business Media, New York.
- Mattfeld, D.C. und H. Kopfer (2003), Terminal operations management in vehicle transshipment, *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 37 (5), 435–452.
- Mauri, G.R., G.M. Ribeiro, L.A.N. Lorena und G. Laporte (2016), An adaptive large neighborhood search for the discrete and continuous Berth allocation problem, *Computers & Operations Research* 70, 140–154.
- Mayer, G. und C. Pöge (2010), Auf dem Weg zum Standard – Von der Idee zur Umsetzung des VDA Automotive Bausteinkastens, Konferenzpapier, ASIM Fachtagung 2010, Karlsruhe.
- Mayer, H. (2017), The Physical Harbor: New Demands on a Scarce Resource, in: Hershman, M.J. (Hrsg.), *Urban Ports and Harbor Management: Responding to Change along U.S. Waterfronts*, Routledge.
- Mehta, S.V. und R.M. Uzsoy (1998), Predictable scheduling of a job shop subject to breakdowns, *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 14 (3), 365–378.
- M'hand, M.A., A. Boulmakoul, H. Badir und A. Lbath (2019), A scalable real-time tracking and monitoring architecture for logistics and transport in RoRo terminals, *Procedia Computer Science* 151, 218–225.
- Monmarché, N., G. Venturini und M. Slimane (2000), On how *Pachycondyla apicalis* ants suggest a new search algorithm, *Future Generation Computer Systems* 16 (8), 937–946.
- Morecroft, J.D.W. und S. Robinson (2005), Explaining Puzzling Dynamics: Comparing the Use of System Dynamics and Discrete-Event Simulation, Konferenzpapier, 23rd International Conference of the System Dynamics Society, Boston.
- Mueller, D., J. Graefenstein, D. Scholz und M. Henke (2019), Complexity-Oriented Evaluation of Production Systems for Online-Switching of Autonomous Control Methods, in: Clausen, U., S. Langkau und F. Kreuz (Hrsg.), *Advances in Production, Logistics and Traffic*, Lecture Notes in Logistics, Springer International Publishing, Cham, 246–264.
- Mullen, R.J., D. Monekosso, S. Barman und P. Remagnino (2009), A review of ant algorithms, *Expert Systems with Applications* 36 (6), 9608–9617.
- Muller, P.-A., F. Fondement, B. Baudry und B. Combemale (2012), Modeling modeling modeling, *Software & Systems Modeling* 11 (3), 347–359.
- Muravev, D., A. Rakhmangulov und Y.V. Aydogdu (2016), Comparing model development in discrete event simulation on Ro-Ro terminal example, *International Journal of Logistics Systems and Management* 24 (3), 283–297.
- Mustafee, N., S. Brailsford, A. Djanatliev, T. Eldabi, M. Kunc und A. Tolk (2017), Purpose and benefits of hybrid simulation: Contributing to the convergence of its definition,

- 
- Konferenzpapier, 2017 Winter Simulation Conference (WSC), Las Vegas, NV, Dezember.
- Nicol, D.M. (1988), Parallel discrete-event simulation of FCFS stochastic queueing networks, *ACM SIGPLAN Notices* 23 (9), 124–137.
- Nuhn, H. und M. Hesse (2006), *Verkehrsgeographie*, UTB Geographie, 1. Auflage, Brill, Schöningh, Paderborn München Wien Zürich.
- Olhager, J. (2003), Strategic positioning of the order penetration point, *International Journal of Production Economics* 85 (3), 319–329.
- Olivier, D. und B. Slack (2006), Rethinking the Port, *Environment and Planning A: Economy and Space* 38 (8), 1409–1427.
- Ouelhadj, D. und S. Petrovic (2009), A survey of dynamic scheduling in manufacturing systems, *Journal of Scheduling* 12 (4), 417–431.
- Page, B. (1991), *Diskrete Simulation: eine Einführung mit Modula-2*, Springer-Lehrbuch, 1. Auflage, Springer, Berlin.
- Paixao, A.C. und P.B. Marlow (2001), A review of the European Union shipping policy, *Maritime Policy & Management* 28 (2), 187–198.
- Panayides, P.M. und D.-W. Song (2013), Maritime logistics as an emerging discipline, *Maritime Policy & Management* 40 (3), 295–308.
- Parma, G.G. und V. Dinavahi (2007), Real-Time Digital Hardware Simulation of Power Electronics and Drives, *IEEE Transactions on Power Delivery* 22 (2), 1235–1246.
- Patzak, G. (1982), *Systemtechnik — Planung komplexer innovativer Systeme*, 1. Auflage, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- Pfohl, H.-C. (2010), *Logistiksysteme: betriebswirtschaftliche Grundlagen*, 8., neu bearb. und aktualisierte Auflage, Springer, Berlin.
- Pinedo, M. (2016), *Scheduling: theory, algorithms, and systems*, 5. Auflage, Springer Science+Business Media.
- Pujawan, I.N. (2004), Schedule nervousness in a manufacturing system: a case study, *Production Planning & Control* 15 (5), 515–524.
- Rabe, M., S. Spieckermann und S. Wenzel (2008), *Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik: Vorgehensmodelle und Techniken*, 1. Auflage, Springer, Berlin.
- Reggelin, T. (2011), *Mesoskopische Modellierung und Simulation logistischer Flusssysteme*, docupoint, Magdeburg.
- Reggelin, T., S. ; Lang, D. Weigert und C. Schauf (2017), *Mesoskopische Simulationsmodelle in der Produktions- und Logistikplanung*, Konferenzpapier, ASIM Fachtagung 2017, Kassel.
- Reither, F. (1997), *Komplexitätsmanagement: Denken und Handeln in komplexen Situationen*, Gerling Akad. Verl, München.
- Robinson, S. (2005), Discrete-event simulation: from the pioneers to the present, what next?, *Journal of the Operational Research Society* 56 (6), 619–629.
- Ropohl, G. (2009), *Allgemeine Technologie: eine Systemtheorie der Technik*, 3., überarbeitete Auflage, Universitätsverlag Karlsruhe, Karlsruhe.
- Sargent, R.G. (2013), Verification and validation of simulation models, *Journal of Simulation* 7 (1), 12–24.
- van der Schaft, A. und H. Schumacher (2000), in: Thoma, M. (Hrsg.), *An introduction to hybrid dynamical systems*, *Lecture Notes in Control and Information Sciences*, Bd. 251, Springer London, London.
- Scherer, E. und M. Doberstein (1996), Komplexität in der Produktion beherrschen?, *io Management Zeitschrift* 65 (3), 60–64.
- Schmidt, K. (2002), *Methodik zur integrierten Grobplanung von Abläufen und Strukturen mit digitalen Fabrikmodellen*, Publikationsserver der RWTH Aachen University, Aachen.
- Schmidt, M., P. Fronia, F. Fisser und P. Nyhuis (2007), Decentralized planning and control for assembly areas driven by Gentelligent parts, Konferenzpapier, IEEM 2007, Singapore, Dezember.

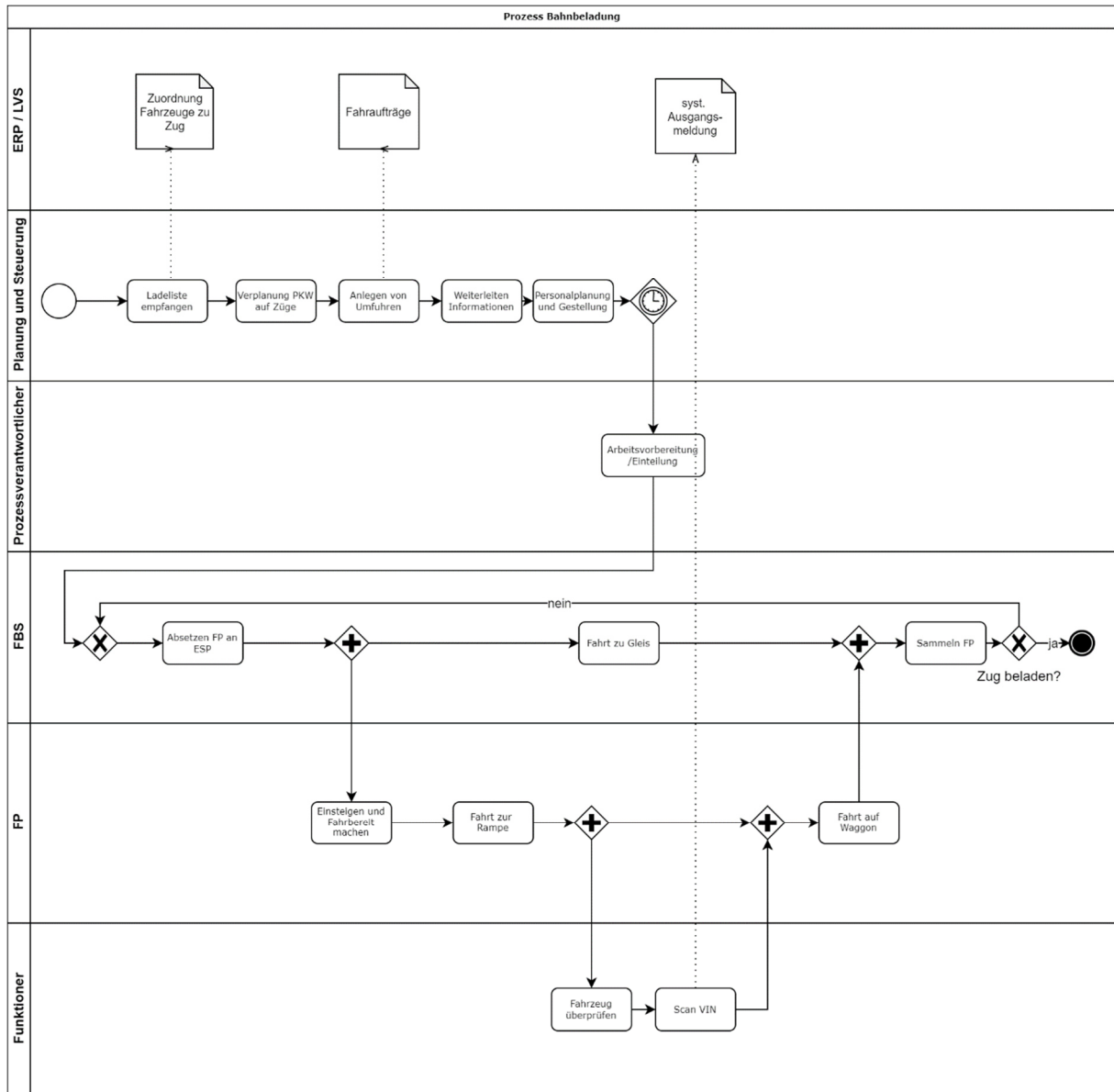
- 
- Scholz-Reiter, B. et al. (2006), Some Remarks on the Stability of Production Networks, in: Haasis, H.-D., H. Kopfer und J. Schönberger (Hrsg.), Operations Research Proceedings 2005, Bd. 2005, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 91–96.
- Scholz-Reiter, B., C. de Beer, M. Freitag und T. Jagalski (2008a), Bio-inspired and pheromone-based shop-floor control, *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* 21 (2), 201–205.
- Scholz-Reiter, B., S. Dashkovskiy, M. Görges und L. Naujok (2011a), Stability analysis of autonomously controlled production networks, *International Journal of Production Research* 49 (16), 4857–4877.
- Scholz-Reiter, B., M. Görges, T. Jagalski und S. Sowade (2011b), Vorgehensmodell zur Entwicklung von Selbststeuerungsstrategien, *Industrie Management* 27 (1), 55–58.
- Scholz-Reiter, B., T. Jagalski und J.C. Bendul (2008b), Autonomous Control of a Shop Floor Based on Bee's Foraging Behaviour, in: Kreowski, H.-J., B. Scholz-Reiter und H.-D. Haasis (Hrsg.), Dynamics in Logistics, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 415–423.
- Scholz-Reiter, B. und C. Meinecke (2011), Nutzen von Informationstransparenz im Seehafenterminal, *Productivity Management* 16, 56–58.
- Scholz-Reiter, B., H. Rekersbrink und M. Görges (2010), Dynamic flexible flow shop problems—Scheduling heuristics vs. autonomous control, *CIRP Annals* 59 (1), 465–468.
- Schriber, T.J., D.T. Brunner und J.S. Smith (2013), Inside discrete-event simulation software: How it works and why it matters, Konferenzpapier, 2013 Winter Simulation Conference - (WSC 2013), Washington, DC, USA, Dezember.
- Schukraft, S. et al. (2017), Interaktive Planung und Steuerung für den Automobilumschlag, *Industrie 4.0 Management* 33 (6), 11–14.
- Schukraft, S., S. Grundstein, B. Scholz-Reiter und M. Freitag (2016), Evaluation approach for the identification of promising methods to couple central planning and autonomous control, *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* 29 (4), 438–461.
- Seidewitz, E. (2003), What models mean, *IEEE Software* 20 (5), 26–32.
- Selic, B. (2003), The pragmatics of model-driven development, *IEEE Software* 20 (5), 19–25.
- Selviaridis, K. und M. Spring (2007), Third party logistics: a literature review and research agenda, *The International Journal of Logistics Management* 18 (1), 125–150.
- Semini, M., H. Fauske und J. Strandhagen (2006), Applications of Discrete-Event Simulation to Support Manufacturing Logistics Decision-Making: A Survey, Konferenzpapier, 2006 Winter Simulation Conference, Monterey, CA, USA, Dezember.
- Sheard, S.A. und A. Mostashari (2009), Principles of complex systems for systems engineering, *Systems Engineering* 12 (4), 295–311.
- Shepherd, S.P. (2014), A review of system dynamics models applied in transportation, *Transportmetrica B: Transport Dynamics* 2 (2), 83–105.
- Shinbrot, T., C. Grebogi, J. Wisdom und J.A. Yorke (1992), Chaos in a double pendulum, *American Journal of Physics* 60 (6), 491–499.
- Siderska, J. (2016), Application of Tecnomatix Plant Simulation for modeling production and logistics processes, *Business, Management and Education* 14 (1), 64–73.
- Sinha, K. und O.L. de Weck (2016), Empirical Validation of Structural Complexity Metric and Complexity Management for Engineering Systems, *Systems Engineering* 19 (3), 193–206.
- Smith, C.A. und A.B. Corripio (2006), Principles and practice of automatic process control, 3. Auflage, Wiley, Hoboken, NJ.
- Sommerer, G. (1998), Unternehmenslogistik: ausgewählte Instrumentarien zur Planung und Organisation logistischer Prozesse, Hanser-Lehrbuch, Hanser, München.
- Song, D.-W. und P.M. Panayides (2008), Global supply chain and port/terminal: integration and competitiveness, *Maritime Policy & Management* 35 (1), 73–87.
- Sowade, S., D. Rippel und B. Scholz-Reiter (2012), Modeling concept for the infrastructure of autonomous logistic processes, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 5 (4), 254–266.
-

- 
- Spur, G. (2007), *Erscheinungsformen und Modelle technischer Systeme: Beitrag zur theoretischen Begründung der Technikwissenschaften*, *Wissenschaft und Technik in theoretischer Reflexion*, *Wissenschaftsforschung*, Jahrbuch 2006, Peter Lang, Bern ; New York.
- Stachowiak, H. (1973), *Allgemeine Modelltheorie*, Springer, Wien.
- Stahlbock, R. und S. Voß (2007), *Operations research at container terminals: a literature update*, *OR Spectrum* 30 (1), 1–52.
- Tako, A.A. und S. Robinson (2009), *Comparing discrete-event simulation and system dynamics: users' perceptions*, *Journal of the Operational Research Society* 60 (3), 296–312.
- Talley, W.K. (2009), *Port economics*, Routledge, London ; New York.
- Taneja, P., H. Ligteringen und W.E. Walker (2012), *Flexibility in Port Planning and Design*, *European Journal of Transport and Infrastructure Research* 12 (1), 1–23.
- Tao, F., J. Cheng, Q. Qi, M. Zhang, H. Zhang und F. Sui (2018), *Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data*, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 94 (9–12), 3563–3576.
- Tolio, T., M. Urgo und J. Váncza (2011), *Robust production control against propagation of disruptions*, *CIRP Annals* 60 (1), 489–492.
- Tolk, A., A. Harper und N. Mustafee (2021), *Hybrid models as transdisciplinary research enablers*, *European Journal of Operational Research* 291 (3), 1075–1090.
- Torrisi, F.D. und A. Bemporad (2004), *HYSDEL—A Tool for Generating Computational Hybrid Models for Analysis and Synthesis Problems*, *IEEE Transactions on Control Systems Technology* 12 (2), 235–249.
- Turner, C.J., W. Hutabarat, J. Oyekan und A. Tiwari (2016), *Discrete Event Simulation and Virtual Reality Use in Industry: New Opportunities and Future Trends*, *IEEE Transactions on Human-Machine Systems* 46 (6), 882–894.
- Ulrich, H. und G.J.B. Probst (1995), *Anleitung zum ganzheitlichen Denken und Handeln: ein Brevier für Führungskräfte*, 4., unveränd. Auflage, Haupt, Bern.
- Umang, N., M. Bierlaire und I. Vacca (2013), *Exact and heuristic methods to solve the berth allocation problem in bulk ports*, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 54, 14–31.
- Van Dyke Parunak, H. (1997), *„Go to the ant“: Engineering principles from natural multi-agent systems*, *Annals of Operations Research* 75, 69–101.
- VDI (2014), *VDI 3633 Blatt 1:2014-12: Titel (Deutsch): Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen – Grundlagen*.
- Vieira, G.E., J.W. Herrmann und E. Lin (2003), *Rescheduling Manufacturing Systems: A Framework of Strategies, Policies, and Methods*, *Journal of Scheduling* 6 (1), 39–62.
- Vilkelis, A. und S. Jakovlev (2013), *Outbound supply chain collaboration modelling based on the automotive industry*, *Transport* 29 (2), 223–230.
- Voß, S., R. Stahlbock und D. Steenken (2004), *Container terminal operation and operations research - a classification and literature review*, *OR Spectrum* 26 (1), 3–49.
- Wang, T. und K. Cullinane (2015), *The Efficiency of European Container Terminals and Implications for Supply Chain Management*, in: Haralambides, H.E. (Hrsg.), *Port Management*, Palgrave Macmillan UK, London, 253–272.
- Wei, Y., H. Wang und F. Chen (2015), *Exploring the Impact of Network Structure and Demand Collaboration on the Dynamics of a Supply Chain Network Using a Robust Control Approach*, *Mathematical Problems in Engineering* 2015, 1–13.
- Wenzel, S. (2018), *Simulation logistischer Systeme*, in: Tempelmeier, H. (Hrsg.), *Modellierung logistischer Systeme*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 1–34.
- Westphal, J.R. (2001), *Komplexitätsmanagement in der Produktionslogistik*, Deutscher Universitätsverlag, Wiesbaden.
- Wiendahl, H.-P. (2009), *Betriebsorganisation für Ingenieure*, 7., aktualisierte Auflage, Hanser Verlag, München.
- Wiendahl, H.-P. und S. Lutz (2002), *Production in Networks*, *CIRP Annals* 51 (2), 573–586.

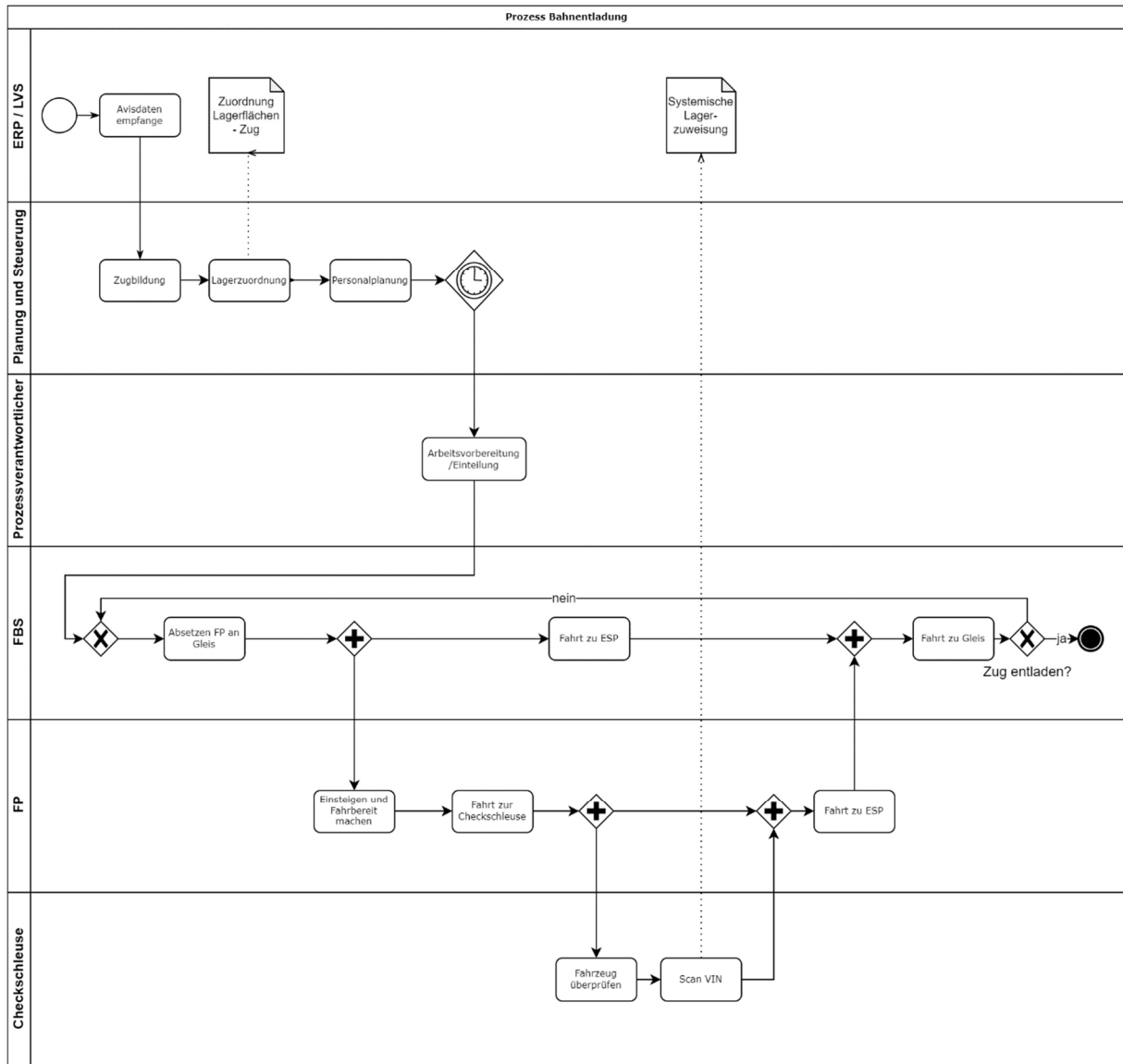
- 
- Wiendahl, H.-P. und P. Scholtissek (1994), Management and Control of Complexity in Manufacturing, *CIRP Annals* 43 (2), 533–540.
- Wildemann, H. (2008), Entwicklungspfade der Logistik, in: Baumgarten, H. (Hrsg.), *Das Beste der Logistik*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 161–172.
- Windt, K., T. Becker, O. Jeken und A. Gelessus (2010), A classification pattern for autonomous control methods in logistics, *Logistics Research* 2 (2), 109–120.
- Windt, K. und M. Hülsmann (2007), Changing Paradigms in Logistics — Understanding the Shift from Conventional Control to Autonomous Cooperation and Control, in: Hülsmann, M. und K. Windt (Hrsg.), *Understanding Autonomous Cooperation and Control in Logistics*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 1–16.
- Woo, S., S.J. Pettit und A.K.C. Beresford (2013), An assessment of the integration of seaports into supply chains using a structural equation model, *Supply Chain Management: An International Journal* 18 (3), 235–252.
- Woo, S.-H., S.J. Pettit, D.-W. Kwak und A.K.C. Beresford (2011), Seaport research: A structured literature review on methodological issues since the 1980s, *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 45 (7), 667–685.
- Zawadzki, T. und R. Pytlak (2011), Extending System Dynamics approach to higher index DAE's, *Proceedings of The 29th International Conference of the System Dynamics Society*, Washington, DC, 1–12.

# Anhang

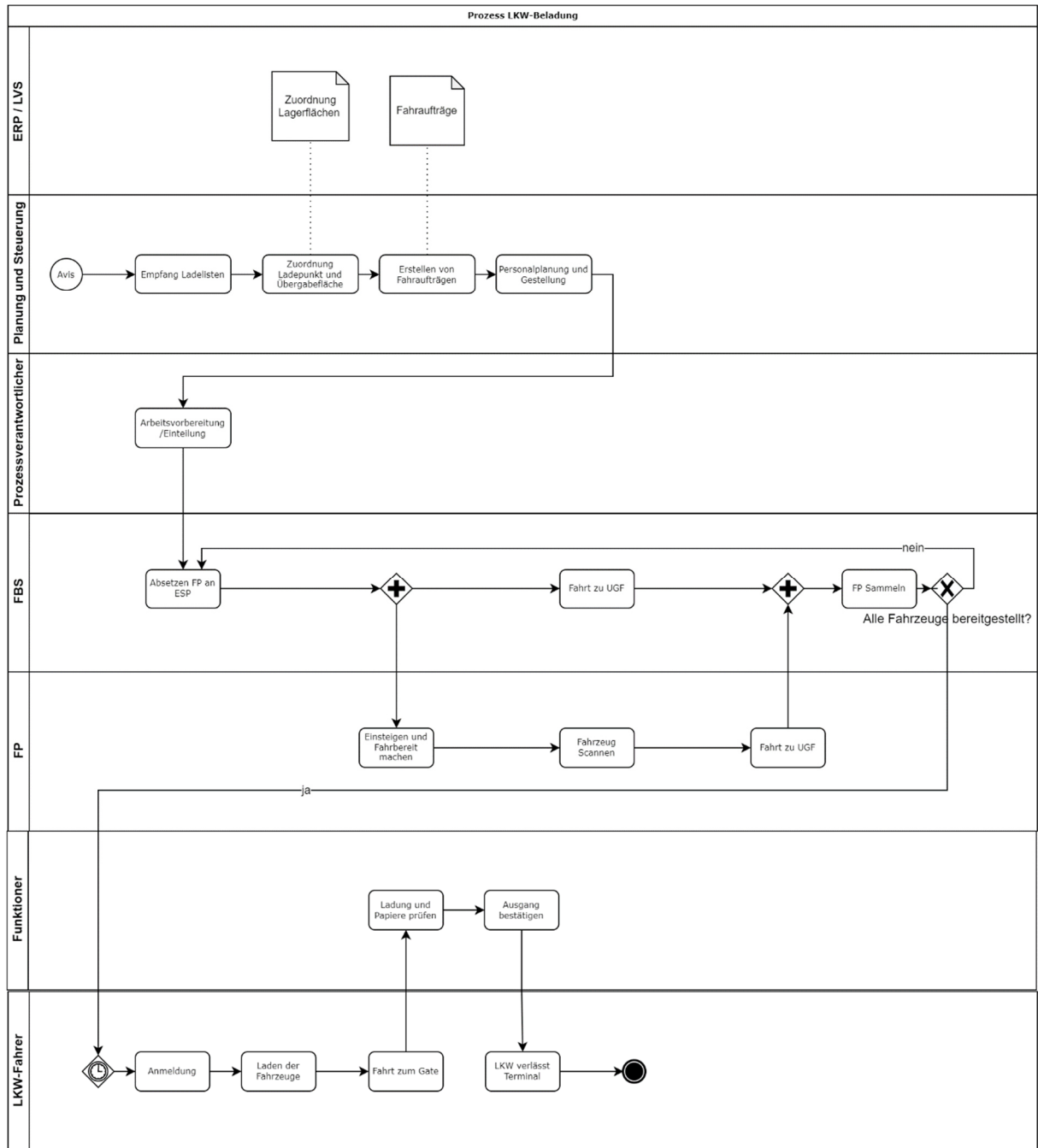
## Anhang 1. Prozessmodell Bahnbeladung



## Anhang 2. Prozessmodell Bahnentladung

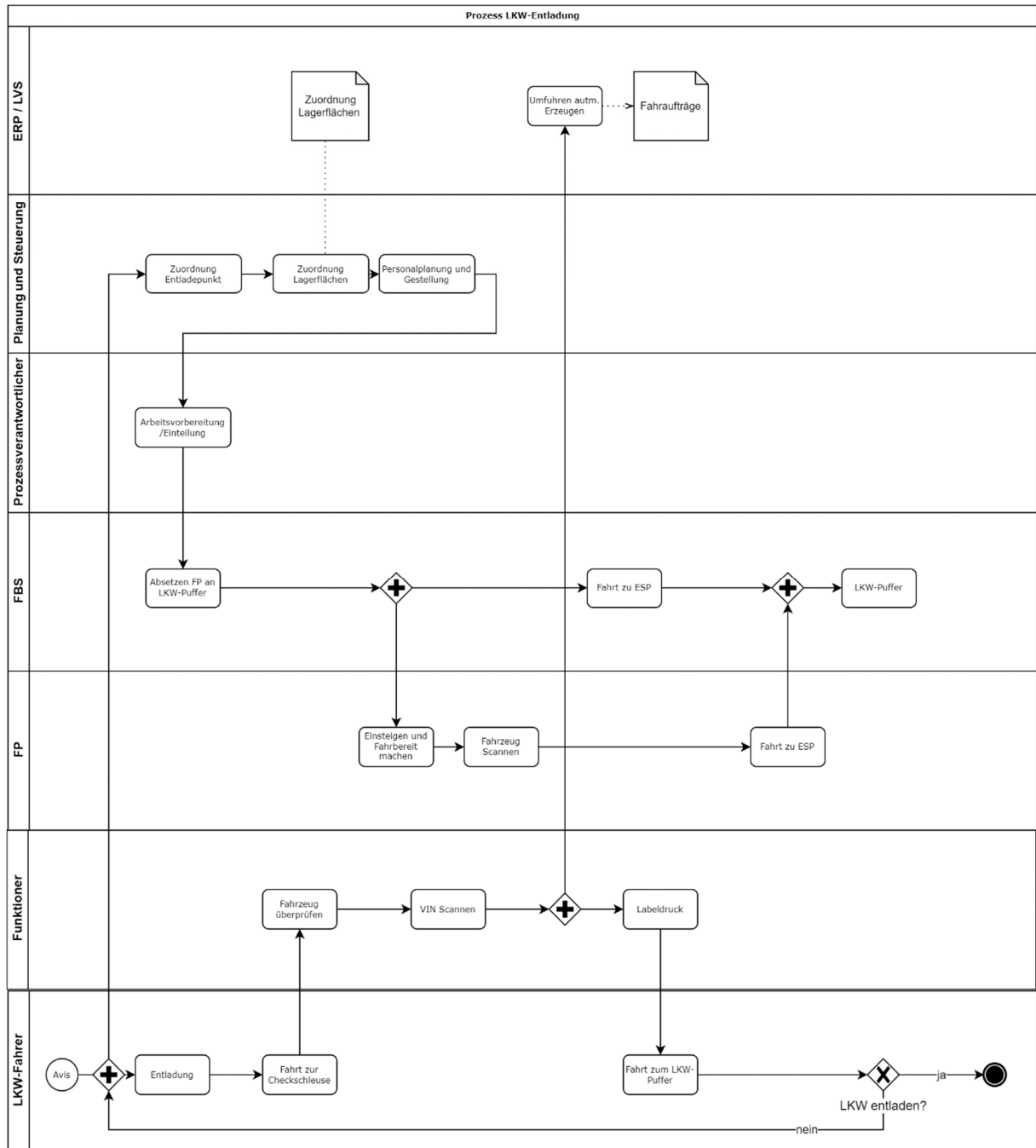


# Anhang 3. Prozessmodell Lkw-Beladung

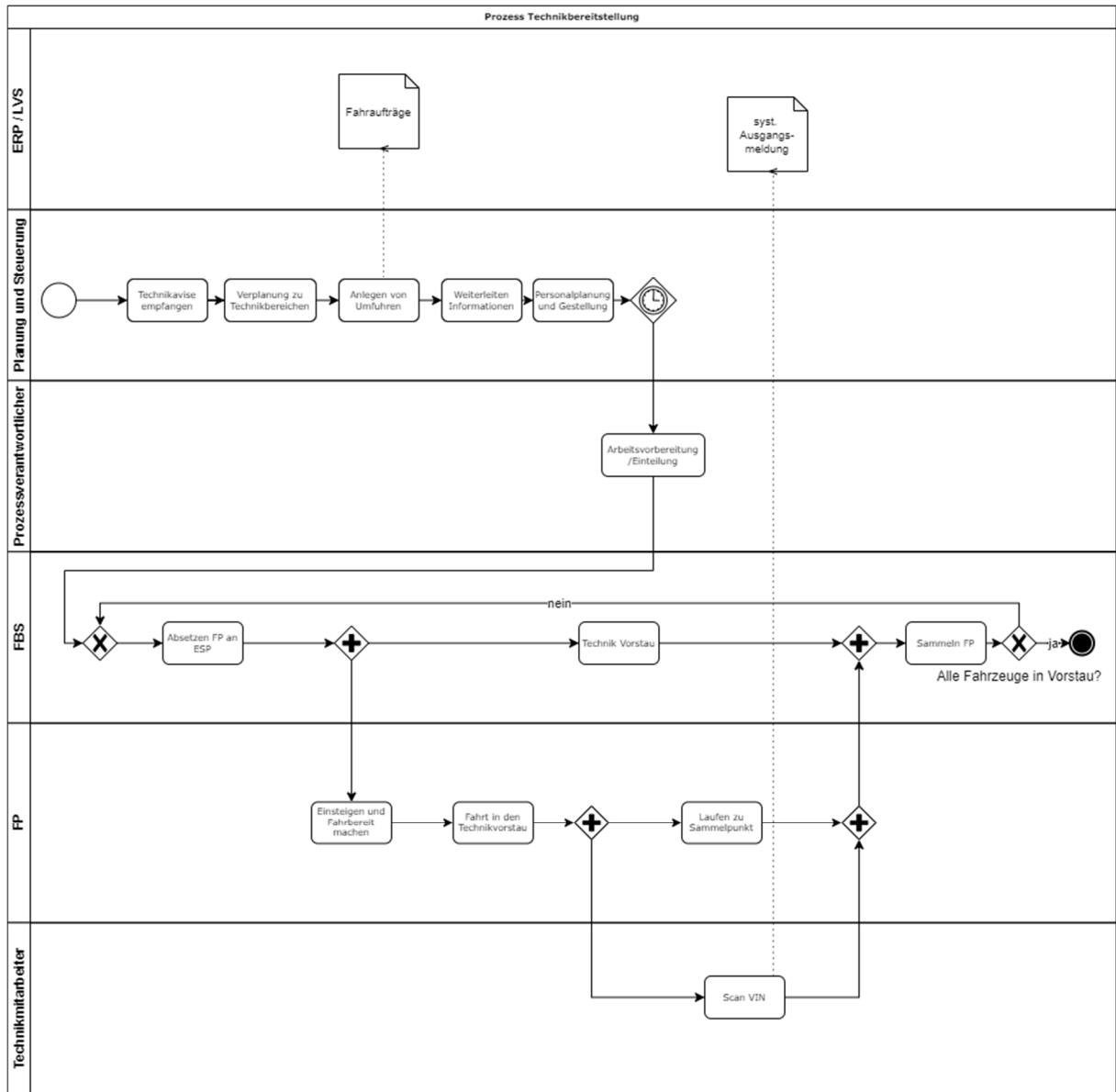




# Anhang 4. Prozessmodell Lkw-Entladung



# Anhang 5. Prozessmodell Technikbewegungen



## Anhang 6. Statische Fahrzeugdaten

Datum	Beispiel	Beschreibung	Erfassung / Quelle
VIN	WAUDK8XXXRN029130	Fahrgestellnummer	DFÜ
Fahrzeug ID (InstanzID)	26897899	Interne ID des IT-System	intern
Hersteller	Hersteller 1	Name des Hersteller	DFÜ
Bestandskunde	Kunde 2	Name des Kunden	DFÜ
Modell	Coupé 1	Modellname	DFÜ
Obermodell	Coupé	Modellgruppe	DFÜ
Werk	Beispielstadt	Stadt des Werks	DFÜ
Reiserichtung	I	Import (I) oder Export (E)	DFÜ
Eingangszeitpunkt	22.12.2021 13:46	Ersterfassung	MDE (WE-Prozess)
Eingangstransportmittel	Schiff	Schiff, Bahn oder Lkw	DFÜ
Eingangspunkt	NH-AK1	Interne Name des Eingangspunkts	MDE (WE-Prozess)
Auftraggeber Eingang	Kunde 2	Name des Kunden	DFÜ
Herkunftsland	Deutschland		DFÜ
Ladehafen	Brunswick	Nur gefüllt falls Eingangstransportmittel = Schiff	DFÜ
Import Schiff	Morning Ann-Kartin	Nur gefüllt falls Eingangstransportmittel = Schiff	DFÜ
Import Reeder	Reeder 4	Nur gefüllt falls Eingangstransportmittel = Schiff	DFÜ
Importreisenummer	047A	Nur gefüllt falls Eingangstransportmittel = Schiff	DFÜ
Waggon-Nr	238043718192	Nur gefüllt falls Eingangstransportmittel = Bahn	DFÜ
Zug-Nr.	UK067	Nur gefüllt falls Eingangstransportmittel = Bahn	DFÜ / man. Arbeitsplatz
LKW ID	HB-LG XXX	Nur gefüllt falls Eingangstransportmittel = Lkw	DFÜ / man. Arbeitsplatz
Ausgangszeitpunkt	28.12.2021 13:42		MDE (WA-Prozess)
Ausgangstransportmittel	Schiff		MDE (WA-Prozess)
Ausgangspunkt	NH-WPK	Interne Name des Ausgangspunkts	MDE (WA-Prozess)
Destination	Long Beach	Zielstadt	DFÜ
Bestimmungsland	USA	Zielland	DFÜ
Schiffsname	Morning Ann-Kartin	Nur gefüllt falls Ausgangstransportmittel = Schiff	DFÜ
Reise-Nr.	047B	Nur gefüllt falls Ausgangstransportmittel = Schiff	DFÜ
Reeder	Reeder 2	Nur gefüllt falls Ausgangstransportmittel = Schiff	DFÜ
Ausgangs Waggon-Nr	238043718192	Nur gefüllt falls Ausgangstransportmittel = Bahn	DFÜ
Ausgangs Zug-Nr.	UK068	Nur gefüllt falls Ausgangstransportmittel = Bahn	DFÜ

---

## Anhang 7. Bewegungsdaten

<b>Datum</b>	<b>Beispiel</b>	<b>Beschreibung</b>	<b>Erfassung / Quelle</b>
VIN	WAUDK84AXRN029130	Fahrgestellnummer	MDE - Prozess
Fahrzeug ID (InstanzID)	26897899	Interne ID des IT-System	intern
Bereich Senke	UGF	Bereichsnotation	MDE - Prozess
Flaeche Senke	001	Flächennotation	MDE - Prozess
Block Senke	UNG	Blocknotation	MDE - Prozess
Reihe Senke	013	Reihennotation	MDE - Prozess
Platz Senke	002	Platznotation – nur gefüllt wenn Einzelplatzaufstellung vorliegt	MDE - Prozess
Bewegungsart	210	Art der Bewegung (210 = Umfuhr)	MDE - Prozess
Bewegungs-Zeit	14.02.2020 13:12		MDE - Prozess

---

## Anhang 8.Schiffdaten

<b>Datum</b>	<b>Beispiel</b>	<b>Beschreibung</b>	<b>Erfassung / Quelle</b>
Schiff	Morning Ann-Kartin	Name des jeweiligen Schiffs	Man. Erfassung Arbeitsplatz
Reise-Nr.	2113A	Eindeutige Reisnummer	Man. Erfassung Arbeitsplatz
Richtung	I	Import (I) oder Export (E)	Man. Erfassung Arbeitsplatz
Reeder	Reeder 5	Name der Reederei	Man. Erfassung Arbeitsplatz
Umschlag-Beginn	02.02.2020 06:03	Zeitstempel des Arbeitsbeginns	MDE-WE/WA-Prozess
Umschlag-Ende	04.02.2020 11:26	Zeitstempel des Arbeitsendes	MDE-WE/WA-Prozess
Liegeplatz	NH-WK1	Von der Planung zugewiesener und genutzter Liegeplatz	MDE-WE/WA-Prozess
Schiff-Ankunft	01.02.2020 22:35	Ankunftszeit des Schiffes	MDE-WE/WA-Prozess
Schiff-Abfahrt	04.02.2020 12:11	Abfahrtszeit des Schiffes	MDE-WE/WA-Prozess