



TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

TUM School of Engineering and Design

Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik

# **Steuerungskonzept für die Berücksichtigung von gegenseitigen Abhängigkeiten zwischen Transporten in adaptiven automatisierten Materialflusssystemen**

Christian Axel Horst Lieberoth-Leden

Vollständiger Abdruck der von der TUM School of Engineering and Design

der Technischen Universität München

zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzende: Prof. Dr.-Ing. Katrin Wudy

Prüfer\*innen der Dissertation:

1. Prof. Dr.-Ing. Johannes Fottner

2. Prof. Dr.-Ing. Birgit Vogel-Heuser

Die Dissertation wurde am 01.09.2021 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die TUM School of Engineering and Design am 07.02.2022 angenommen.

---

Herausgegeben von:

Prof. Dr.-Ing. Johannes Fottner

**fml** – Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik

Technische Universität München

Zugleich: Dissertation, München, Technische Universität München, 2022

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdruck, der Entnahme von Abbildungen, der Wiedergabe auf fotomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben – auch bei nur auszugsweiser Verwendung – dem Autor vorbehalten.

Layout und Satz: Christian Lieberoth-Leden

Copyright © Christian Lieberoth-Leden 2022

ISBN: 978-3-948514-19-8

Printed in Germany, 2022

## Vorwort

---

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik (fml) der Technischen Universität München. Die inhaltlichen Grundlagen wurden im Rahmen des Forschungsprojekts *iSiKon* geschaffen, das durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördert wurde.

Ich bedanke mich bei meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Johannes Fottner und seinem Vorgänger als Ordinarius Herrn Prof. Dr.-Ing. Willibald A. Günthner für die Begleitung meiner Forschungsarbeit. Insbesondere möchte ich beiden für den reibungslosen Ablauf der Nachfolge danken, der eine kontinuierliche Fortsetzung der Forschungsarbeit ermöglicht hat. Das Forschungsprojekt *iSiKon* sowie viele Veröffentlichungen entstanden in Kooperation mit dem Lehrstuhl für Automatisierung und Informationssysteme. Der Ordinaria Frau Prof. Dr.-Ing. Birgit Vogel-Heuser danke ich für die Übernahme des Korreferats und die konstruktive Begleitung sowie auch Juliane, Thomas und Daniel. Frau Prof. Dr.-Ing. Katrin Wudy danke ich für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Ich danke allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Lehrstuhls *fml* sowie allen Studenten, die mich in meiner Forschungsarbeit fachlich und administrativ unterstützt haben. Ganz besonders möchte ich mich aber bei meinen ehemaligen Kolleginnen und Kollegen für das motivierende und positive Umfeld am und auch außerhalb des *fml* bedanken. Besonders erwähnen möchte ich Andi, Felix, Leo, Sandra und Yannic für die gegenseitige Unterstützung und freundschaftliche Begleitung. Ein großer Dank gilt meinen langjährigen Begleitern als Bürokollegen und fachlichen Diskussionspartnern Markus und Thomas sowie Lars für das zielorientierte Mentoring. Zuletzt gilt aber auch ganz besonders mein Dank meiner Familie für die bedingungslose Unterstützung auf all meinen Wegen. Ich bin immer wieder dankbar für den liebevollen und engen Zusammenhalt als Familie, der nicht zuletzt zum erfolgreichen Abschluss dieser Arbeit geführt hat.

München, April 2022

Christian Lieberoth-Leden



## Kurzzusammenfassung

---

Die Logistik ist zunehmend mit der Herausforderung konfrontiert, dynamisch auf wechselnde Anforderungen zu reagieren und Tätigkeiten stärker zu automatisieren. Eine Antwort auf diese Herausforderungen sind adaptive Materialflusssysteme, die aus einzelnen autonomen Modulen bestehen und die flexibel zu einem System zusammengefügt werden können. Adaptive Materialflusssysteme erfordern daher ein Steuerungskonzept, das einen hohen Grad an Selbstkonfiguration aufweist, mit einer großen Modulheterogenität zurechtkommt und den Materialfluss effizient steuert. Hierfür definiert diese Arbeit Anforderungen an ein Steuerungskonzept. Dabei treten insbesondere in größeren Materialflusssystemen gegenseitige Abhängigkeiten zwischen Transporten auf, welche die Leistungsfähigkeit eines Systems beeinflussen. Diese Arbeit analysiert lokale modulinterne und globale modulübergreifende Transportabhängigkeiten und untersucht deren Einflussparameter. Hierdurch schafft diese Arbeit ein Verständnis für den Einfluss von verschiedenen Arten und Ausprägungen an Transportabhängigkeiten auf die Leistungsfähigkeit eines adaptiven Materialflusssystems. Dies ermöglicht wiederum das Ableiten von Modellen und Berechnungsgrundlagen, um den Einfluss von Transportabhängigkeiten auf die Leistungsfähigkeit eines adaptiven Materialflusssystems zu berechnen. Für die Planung von Materialflüssen setzt diese Arbeit auf semi-statische Routen, die bei veränderten Anforderungen angepasst werden und ansonsten Transporten eine feste Route durch das System vorgeben. Das in dieser Arbeit entwickelte Steuerungskonzept berücksichtigt Transportabhängigkeiten in der Planungsphase von semi-statischen Routen. Zu diesem Zweck wird eine Referenzarchitektur für eine Steuerung ausgearbeitet und das entwickelte Steuerungskonzept in einem Simulationsmodell implementiert. Hierdurch erfolgt der Nachweis, dass Transportabhängigkeiten bereits in der Planungsphase von Routen durch ein adaptives Materialflusssystem berücksichtigt werden können und in der Folge die Leistungsfähigkeit eines adaptiven Materialflusssystems gesteigert werden kann.



## Abstract

---

In logistics the demand rises to dynamically react to alternating material flow requirements and to increase the automation of operations. Adaptive material flow systems propose a solution to the challenges in logistics and consist of autonomous modules, which can flexibly be combined to a material flow system. Adaptive material flow systems require a control concept, which possesses a high degree of self-configuration, copes with a great variety of heterogeneous modules and efficiently coordinates the material flows. This work defines requirements on such a control concept. Particularly, in greater material flow systems there occur mutual dependencies between different transports, which affect the performance of an adaptive material flow system. This work analyzes local module-internal and global module-overreaching transport dependencies and examines the influencing factors. Subsequently, this work creates an understanding of the effect which different kinds and characteristics of transport dependencies have on the performance of an adaptive material flow system. On this basis, models and calculation principles are developed, which allow the calculation of the effect of a transport dependency on the performance of an adaptive material flow system. This work utilizes semi-static routes, which adjust in the case of alternating material flow requirements and otherwise preset a constant route through the system for all transports, to plan material flows through a system. The control concept of this work aims to consider transport dependencies in the planning phase of a semi-static route. For this purpose, a reference control architecture is developed, and the control concept is implemented in a simulation model. Thus, this work evaluates that transport dependencies can be considered in the planning phase of routes and that the control concept results in an increased performance of an adaptive material flow system.



# Inhaltsverzeichnis

---

|   |             |
|---|-------------|
| <b>Vorwort</b>  | <b>III</b>  |
| <b>Kurzzusammenfassung</b>  | <b>V</b>    |
| <b>Abstract</b>   | <b>VII</b>  |
| <b>Inhaltsverzeichnis</b>   | <b>IX</b>   |
| <b>Abkürzungsverzeichnis</b>  | <b>XV</b>   |
| <b>Formelverzeichnis</b>  | <b>XVII</b> |
| <b>1 Einleitung</b>   | <b>1</b>    |
| 1.1 Ausgangssituation   | 1           |
| 1.2 Adaptive automatisierte Materialflusssysteme                        | 3           |
| 1.3 Problemstellung und Zielsetzung                                     | 4           |
| 1.4 Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit                                | 6           |
| 1.5 Abgrenzung zu anderen wissenschaftlichen Arbeiten im Projekt iSiKon | 8           |
| <b>2 Grundlagen</b>   | <b>11</b>   |
| 2.1 Materialflusssysteme  | 11          |
| 2.1.1 Aufgaben von Materialflusssystemen                                | 11          |
| 2.1.2 Fördertechnik   | 12          |
| 2.1.3 Steuerung   | 15          |
| 2.2 Steuerungskonzepte  | 18          |
| 2.2.1 Agentensteuerung  | 18          |
| 2.2.2 Wissensbasis  | 19          |
| 2.3 Steuerung von Transporten in Netzwerken                             | 20          |
| 2.3.1 Einführung in die Graphentheorie                                  | 20          |
| 2.3.2 Algorithmen zur Wegfindung  | 21          |
| 2.3.3 Berücksichtigung von Verkehr in Transportnetzwerken               | 22          |
| 2.3.4 Routing in Telekommunikationsnetzwerken                           | 24          |
| 2.3.5 Verkehrsoptimierung in Telekommunikationsnetzwerken               | 27          |
| 2.4 Analytische Methoden der Materialflussberechnung                    | 30          |
| 2.4.1 Durchsatzberechnung   | 30          |

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| 2.4.2    | Zufallsprozesse und Verteilungen   | 32        |
| 2.4.3    | Berechnung von Warteschlangen  | 33        |
| 2.4.4    | Blockierungen  | 34        |
| 2.4.5    | Reservierung mit Zeitfenstern  | 35        |
| <b>3</b> | <b>Stand der Wissenschaft und Forschungsfrage</b>  | <b>37</b> |
| 3.1      | Stand der Wissenschaft zu adaptiven Systemen   | 37        |
| 3.1.1    | Flexible und adaptive Materialflusssysteme   | 37        |
| 3.1.2    | Flexible und adaptiven Produktionssysteme  | 39        |
| 3.2      | Handlungsbedarf für aMFS   | 41        |
| 3.3      | Forschungsfrage  | 43        |
| <b>4</b> | <b>Anforderungen an ein aMFS</b>   | <b>45</b> |
| 4.1      | Anforderungen an die Systemarchitektur   | 45        |
| 4.2      | Anforderungen an die Gestaltung und Steuerung von autonomen Modulen  | 48        |
| 4.3      | Anforderungen an das Routing und die Transportkoordination   | 50        |
| <b>5</b> | <b>Systemarchitektur für ein aMFS</b>  | <b>53</b> |
| 5.1      | Autonome Materialflussmodule   | 53        |
| 5.2      | Steuerung von aMFM durch ein MAS   | 54        |
| 5.3      | Zentrale Koordinator-Instanz   | 58        |
| 5.4      | Schnittstellen zu externen Systemen  | 60        |
| <b>6</b> | <b>Entwicklung, Inbetriebnahme und Steuerung von aMFM mit Transportabhängigkeiten</b>                      | <b>63</b> |
| 6.1      | Entwicklungsphase: Definition und Beschreibung der logistischen Operationen                                | 64        |
| 6.1.1    | Festlegung der funktionalen Freiheitsgrade   | 64        |
| 6.1.2    | Beschreibung der LO  | 67        |
| 6.1.3    | Beschreibung der logistischen Übergabeoperationen  | 70        |
| 6.1.4    | Beschreibung der Referenzposition und des Interaktionsdurchmessers   | 74        |
| 6.2      | Inbetriebnahmephase: Ermittlung der ausführbaren LO und Übergabeoperationen                                | 75        |
| 6.2.1    | Detektion von neuen aMFM   | 75        |
| 6.2.2    | Lokalisierung von aMFM und Ermittlung der aMFM-Nachbarschaft   | 75        |
| 6.2.3    | Identifikation der Übergaben zwischen zwei aMFM: Konfiguration der Übergabefunktionen zu benachbarten aMFM | 79        |

---

|          |  |            |
|----------|--|------------|
| 6.2.4    | Einrichtung einer Übergabe auf einem aMFM: Konfiguration der Übergabeoperationen       | 80         |
| 6.2.5    | Ermittlung von logistischen Operationsketten   | 83         |
| 6.3      | Betriebsphase: Koordination von LO   | 85         |
| 6.3.1    | Optimierung der LO-Ausführung  | 86         |
| 6.3.2    | Ausführung von LO  | 87         |
| 6.3.3    | Strategische LO-Einplanung   | 88         |
| <b>7</b> | <b>Grundlagen der Routenplanung unter Berücksichtigung von Transportabhängigkeiten</b> | <b>93</b>  |
| 7.1      | Ermittlung von Routen in dynamischen Transportnetzwerken                               | 93         |
| 7.1.1    | Vergleich von statischen und dynamischen Routingverfahren                              | 94         |
| 7.1.2    | Unterscheidungsmerkmale zwischen aMFS und Telekommunikationsnetzwerken                 | 95         |
| 7.1.3    | Einsatz von semi-statischen Routen in Transportnetzwerken                              | 96         |
| 7.2      | Ermittlung von lokalen aMFM und globalen aMFS Topologien                               | 98         |
| 7.2.1    | Struktur der aMFS Topologie  | 98         |
| 7.2.2    | Verbindungseigenschaft: Transportzeit und Belegzeit                                    | 100        |
| 7.2.3    | Verbindungseigenschaft: Taktzeit   | 103        |
| 7.2.4    | Verbindungseigenschaft: Maximale und verfügbare Kapazität                              | 107        |
| 7.3      | Berücksichtigung von gegenläufigen Materialflussströmen                                | 109        |
| 7.3.1    | Berechnung der Kapazität in bB   | 110        |
| 7.3.2    | Ermittlung der lokalen aMFM Topologie-Eigenschaften bei gegenläufigen ssR              | 117        |
| 7.3.3    | Berücksichtigung von gegenläufigen ssR bei der Routenberechnung                        | 120        |
| <b>8</b> | <b>Routenberechnung und Transportkoordination</b>                                      | <b>125</b> |
| 8.1      | Bestimmung von Materialflussrelationen   | 125        |
| 8.2      | Routenberechnung von ssR   | 127        |
| 8.2.1    | Einrichtung von ssR  | 131        |
| 8.2.2    | Absagen von ssR  | 132        |
| 8.3      | Optimierung von ssR  | 132        |
| 8.3.1    | Identifikation von Optimierungspotential   | 133        |
| 8.3.2    | Koordination von Optimierungen   | 134        |
| 8.3.3    | Durchführung einer Optimierung   | 136        |
| 8.4      | Koordination von Transporten   | 139        |

|           |   |            |
|-----------|---|------------|
| 8.4.1     | Startzeitpunkt bestimmen  | 140        |
| 8.4.2     | Reservierung einplanen  | 144        |
| 8.4.3     | Transport ausführen   | 146        |
| 8.5       | Ausfall von aMFM  | 147        |
| <b>9</b>  | <b>Implementierung</b>  | <b>151</b> |
| 9.1       | Struktur des Simulationsmodells   | 152        |
| 9.1.1     | Modellierung des MAS für ein aMFS   | 152        |
| 9.1.2     | Modellierung eines aMFM   | 152        |
| 9.1.3     | Modellierung eines aMFS   | 153        |
| 9.1.4     | Auftragssteuerung   | 154        |
| 9.1.5     | Kommunikation   | 154        |
| 9.2       | Implementierung des Simulationsmodells  | 155        |
| 9.2.1     | Automatische Generierung des Simulationsmodells   | 155        |
| 9.2.2     | Serverwerkzeug und Koordinatorebene   | 156        |
| 9.2.3     | Konfigurationsebene   | 156        |
| 9.2.4     | Materialflussebene  | 157        |
| 9.2.5     | Funktionsebene  | 158        |
| 9.2.6     | Systemebene   | 159        |
| <b>10</b> | <b>Evaluation der Berücksichtigung von Transportabhängigkeiten in der Planungsphase</b> | <b>161</b> |
| 10.1      | Durchführung und Auswertung der Simulationsstudien                                      | 161        |
| 10.2      | aMFM Konfiguration  | 162        |
| 10.2.1    | Granularität  | 162        |
| 10.2.2    | Strategische LO-Einplanung  | 164        |
| 10.3      | Grundlagen der Routenberechnung   | 165        |
| 10.3.1    | Berechnung der verfügbaren Kapazität  | 165        |
| 10.3.2    | Abhängigkeiten in bB  | 167        |
| 10.3.3    | Verschachtelte bB   | 172        |
| 10.4      | Routenberechnung  | 175        |
| 10.4.1    | Routenberechnung mit verschachtelten bB   | 175        |
| 10.4.2    | Routenberechnung und Auswahl  | 178        |
| 10.4.3    | Optimierung   | 181        |
| 10.5      | Koordination  | 182        |
| 10.5.1    | Reservierungsverfahren  | 183        |

---

|                 |  |            |
|-----------------|--|------------|
| 10.5.2          | Berechnung und Auswahl der Reservierungsintervalle | 184        |
| <b>11</b>       | <b>Zusammenfassung und Fazit</b>                   | <b>187</b> |
| 11.1            | Zusammenfassung                                    | 187        |
| 11.2            | Fazit  | 190        |
| 11.3            | Ausblick   | 192        |
|                 | <b>Literaturverzeichnis</b>                        | <b>195</b> |
|                 | <b>Abbildungsverzeichnis</b>                       | <b>209</b> |
|                 | <b>Tabellenverzeichnis</b>                         | <b>217</b> |
| <b>Anhang A</b> | <b>Materialfluss-Schnittstellen</b>                | <b>A-1</b> |
| <b>Anhang B</b> | <b>Implementierung</b>                             | <b>B-1</b> |



# Abkürzungsverzeichnis

---

| <b>Abkürzung</b> | <b>Bedeutung</b>  |
|------------------|---|
| AIS              | Lehrstuhl für Automatisierung und Informationssysteme   |
| aMFM             | Autonomes Materialflussmodul  |
| aMFS             | Adaptives automatisiertes Materialflusssystem   |
| APSP             | All Pairs Shortest Path Problem   |
| bB               | bidirektionaler Bereich   |
| CSPF             | Constrained Shortest Path First   |
| DFG              | Deutsche Forschungsgemeinschaft   |
| ERP              | Enterprise Resource Planning  |
| FIPA             | Foundation for Intelligent Physical Agents  |
| fml              | Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik  |
| FTS              | Fahrerloses Transportsystem   |
| GPS              | Global Positioning System   |
| ID               | Identifikationsnummer   |
| iSiKon           | Gesteigerte Flexibilität in heterogen aufgebauten Materialflusssystemen auf Basis intelligenter Softwareagenten in selbstkonfigurierender Fördertechnik |
| LO               | Logistische Operationen   |
| LSP              | Label Switched Path   |
| MAS              | Multi-Agenten-System  |
| MFR              | Materialflussrechner  |
| MFS              | Automatisiertes Materialflusssystem   |
| MPLS             | Multiprotocol Label Switching   |
| QVW              | Querverschiebewagen   |

|       |                                     |
|-------|-------------------------------------|
| RFID  | Radio-Frequency Identification      |
| SPF   | Shortest Path First                 |
| SPP   | Single Pair Shortest Problem        |
| SPS   | Speicherprogrammierbare Steuerung   |
| SSP   | Single Source Shortest Path Problem |
| ssR   | semi-statische Route                |
| SysML | System Modeling Language            |
| TE    | Transporteinheit                    |
| UWB   | Ultra-Wideband                      |
| VDA   | Verband der Automobilindustrie      |
| WLAN  | Wireless Local Area Network         |
| WMS   | Warehouse Management System         |
| z. B. | zum Beispiel                        |

## Formelverzeichnis

---

| <b>Zeichen</b>     | <b>Einheit</b>    | <b>Bedeutung</b>  |
|--------------------|-------------------|---|
| $a$                | [-]               | Bezeichnung eines Arbeitsraums auf einem aMFM           |
| $E_{Ankunft}(T)$   | [s]               | Ankunftsprozess   |
| $E_{Ankunft}(t_a)$ | [s]               | Erwartungswert Ankunftsprozess (Warteschlangensystem)   |
| $E_{Ankunft}(t_b)$ | [s]               | Erwartungswert Bedienprozess (Warteschlangensystem)     |
| $n$                | [-]               | Bezeichnung einer Verbindung durch ein aMFM             |
| $N_{Bl}$           | [-]               | Durchschnittliche Blockgröße in einem bB                |
| $N_W$              | [-]               | Länge der Warteschlange (Warteschlangensystem)          |
| $L$                | [-]               | Anzahl an Objekten in einem System (Gesetz nach Little) |
| $r$                | [-]               | Richtung in einem bB                                    |
| $s$                | [s <sup>2</sup> ] | Streuung für eine Ankunftsrate                          |
| $t_a$              | [s]               | Zwischenankunftszeit (Warteschlangensystem)             |
| $t_b$              | [s]               | Bedienzeit (Warteschlangensystem)                       |
| $t_{Bea}$          | [s]               | Bearbeitungszeit  |
| $t_{theoBea}$      | [s]               | Theoretische Bearbeitungszeit                           |
| $t_{exV}$          | [s]               | Externe Vorbereitungszeit                               |
| $t_{inV}$          | [s]               | Interne Vorbereitungszeit                               |

|                 |       |   |
|-----------------|-------|---|
| $t_{theoinV}$   | [s]   | Theoretische interne Vorbereitungszeit  |
| $t_{bB,T}$      | [s]   | Transportzeit durch einen bB  |
| $t_{bB,Ta}$     | [s]   | Taktzeit eines bB   |
| $T_B$           | [s]   | Belegzeit   |
| $T_{theoB}$     | [s]   | Theoretische Belegzeit  |
| $T_{B,eff,ssR}$ | [s]   | Effektive Belegzeit einer ssR   |
| $T_{bB,Ges}$    | [s]   | Auslastung eines bidirektionales Bereichs   |
| $T_{Bl}$        | [s]   | Zeitraum zur Abfertigung eines Blocks in einem bB                                 |
| $T_{Bl,auf}$    | [s]   | Zeitraum zum Aufbau eines Blocks in einem bB                                      |
| $T_T$           | [s]   | Transportzeit   |
| $T_{Ta}$        | [s]   | Taktzeit  |
| $T_{theoTa}$    | [s]   | Theoretische Taktzeit   |
| $W$             | [s]   | Durchschnittliche Transportdauer der Objekte in einem System (Gesetz nach Little) |
| $\alpha$        | [-]   | Übergangswahrscheinlichkeit   |
| $\lambda$       | [1/s] | Mittlerer Durchsatz   |
| $\lambda_A$     | [1/s] | Erwartete Ankunftsrate (Gesetz nach Little)                                       |
| $\lambda_{A,j}$ | [1/s] | Partialstrom des Ausgangs $j$   |
| $\lambda_{E,i}$ | [1/s] | Partialstrom des Eingangs $i$   |

|                      |       |   |
|----------------------|-------|---|
| $\lambda_{Grenz}$    | [1/s] | Grenzdurchsatz  |
| $\lambda_{bB,Grenz}$ | [1/s] | Grenzdurchsatz eines bB                               |
| $\lambda_{Max}$      | [1/s] | Maximale Kapazität                                    |
| $\lambda_{Res}$      | [1/s] | Reservierte Kapazität                                 |
| $\lambda_{Ver}$      | [1/s] | Verfügbare Kapazität                                  |
| $\rho$               | [-]   | Wahrscheinlichkeitsdichte                             |
| $\tau$               | [s]   | Taktzeit  |
| $\tau_0$             | [s]   | Minimale Taktzeit                                     |
| $\tau_P$             | [s]   | Mittlere Taktzeit                                     |
| $\omega_E(\tau)$     | [-]   | Wahrscheinlichkeitsfunktion der Exponentialverteilung |
| $\omega_N(\tau)$     | [-]   | Wahrscheinlichkeitsfunktion der Normalverteilung      |



# 1 Einleitung

## 1.1 Ausgangssituation

Die Logistik stellt in Handels- und Industrieunternehmen oftmals einen wesentlichen Kostenfaktor dar [Han-2009], dessen Minimierung zu Kostenvorteilen gegenüber Wettbewerbern führt [Jün-1989a, S. 29]. Insbesondere in gesättigten Märkten besteht die Möglichkeit, dass sich Unternehmen über die Logistik differenzieren. So kann bei einem vergleichbaren Produktpreis eine kurze Lieferzeit den Ausschlag für eine Kaufentscheidung geben [Fug-2010, S. 43ff.].

Eine weitere Differenzierung erfolgt über das Produkt. Die Produktion reagiert auf die Differenzierung mit einer adaptiven Produktion, die in der Lage ist, individuellere Produkte, kleinere Stückzahlen und kürzere Produktzyklen zu realisieren sowie auf Änderungen, wie z.B. Ausfälle, flexibel reagieren kann. Die adaptive Produktion löst starre Takte auf, um Prozesse (Arbeitsstationen) flexibel miteinander zu verketten, zu verändern, zu entfernen oder hinzuzufügen [Nyh-2008, S. 88f.; Bau-2014, S. 21f.; Drö-2017, S. 432ff.], wie in Abbildung 1-1 schematisch dargestellt und in [fml-2016b] am Beispiel der Automobilproduktion beschrieben. Die Industrie 4.0 bietet das Potential durch die intelligente Vernetzung von Maschinen, Produkten und Prozessen eine adaptive Produktion zu realisieren [Bau-2013, S. 19f.]. Auch die Logistik muss sich auf ein volatiles Umfeld sowie den Wandel in der Produktion einstellen. Als Reaktion muss sich die Logistik flexibel anpassen sowie optimieren können. Adaptive Logistiksysteme sind eine Antwort auf diese Herausforderung [Gün-2016, S. 97f.].

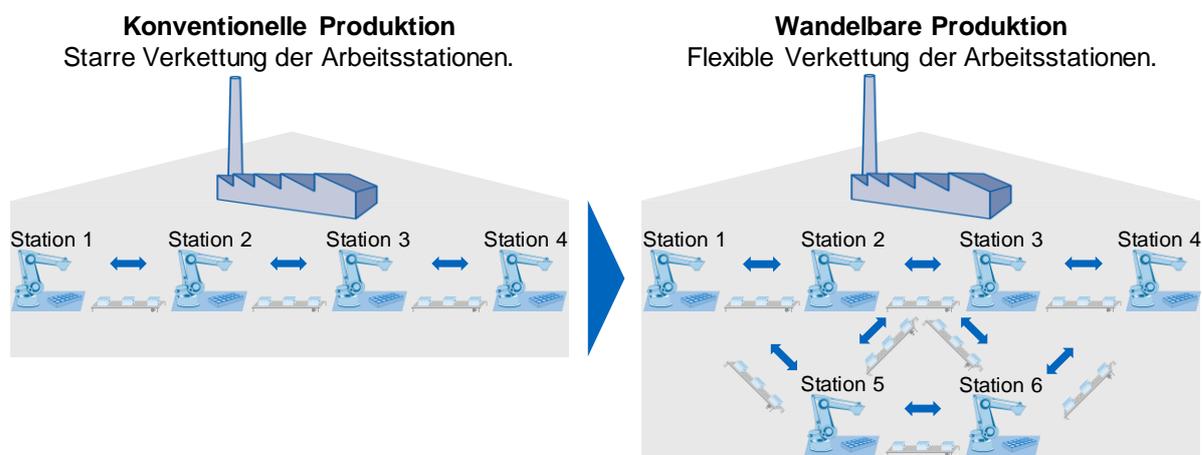


Abbildung 1-1: Schematische Darstellung einer adaptiven Produktion.

In einer adaptiven Produktion ändert sich, verglichen mit einer konventionellen Produktion, häufiger das Layout sowie die Richtung und das Volumen der Materialflüsse. Materialflusssysteme verbinden die einzelnen Arbeitsstationen in einer Produktion und müssen daher ebenfalls adaptiv gestaltet sein. Neben dem Einsatz in der Produktion, werden Materialflusssysteme auch in Lagersystemen und in der Kommissionierung eingesetzt. Auch hier äußert sich das geänderte Lieferverhalten und die Produkthanforderungen, da ein Lagersystem und die Kommissionierung entweder eine Produktion oder direkt den Endkunden bedienen.

Materialflusssysteme liegen in unterschiedlichen technischen Ausprägungen vor. Kleinskalige Fördertechnik wie ein fahrerloses Transportsystem (FTS) setzt sich aus einem oder mehreren fahrerlosen Transportfahrzeugen zusammen. Die Fahrzeuge eines FTS nehmen eine oder mehrere Transporteinheiten (TE) auf und führen einen Transport zwischen zwei Übergabestellen durch. Automatisierte Materialflusssysteme (MFS) führen ebenfalls den innerbetrieblichen Transport von Stückgütern durch und bestehen aus einzelnen fördertechnischen Komponenten, die an einer definierten Position stehen und über einen begrenzten Aktionsradius verfügen. Da es keine standardisierten fördertechnischen Komponenten gibt, liegen die Komponenten in unterschiedlichen technischen Ausprägungen vor, wie in Abbildung 1-2 anhand zweier Systembeispiele gezeigt. Bei MFS wird die TE zwischen den Komponenten von einer Start- zu einer Zielkomponente übergeben.



Bild: © SSI Schäfer



Bild: © SSI Schäfer



Bild: ROFA INDUSTRIAL AUTOMATION AG

Abbildung 1-2: *Beispiele für die Ausprägung von MFS (Bilder: © SSI Schäfer und ROFA INDUSTRIAL AUTOMATION AG).*

FTS bieten eine gute Anpassungsfähigkeit auf Änderungen des Layouts sowie Skalierbarkeit bei wechselnden Materialflussströmen durch das Hinzufügen oder Entfernen von Fahrzeugen. Allerdings weisen MFS in bestimmten Einsatzszenarien auch in Zukunft Vorteile gegenüber FTS auf. So ist der Durchsatz bei MFS beim Einsatz von Rollenförderern deutlich höher und wirtschaftlicher als bei einem FTS. Dies gilt insbesondere bei beengten Platzverhältnissen, da sich die Fahrzeuge eines FTS z. B. beim Rangieren gegenseitig behindern. Weitere Gründe für den Einsatz von MFS sind Raumrestriktionen, wenn z. B. am Boden kein Platz für Fahrspuren vorhanden ist. In

vielen bestehenden Logistik- und Produktionssystemen sind MFS bereits vorhanden und sollen auch in Zukunft genutzt werden. Kleinskalige Fördertechnik stellt eine Ergänzung zu MFS dar, bietet aber keinen vollständigen Ersatz.

Bei MFS wird das Zusammenspiel der teilweise sehr unterschiedlichen Komponenten durch eine anlagenindividuelle zentrale Materialflusssteuerung sichergestellt. Die Entwicklung der Materialflusssteuerung bei der Neuplanung oder Erweiterung von Anlagen geht mit einem manuellen Aufwand einher. So müssen in der Materialflusssteuerung alle verbauten Fördertechnikkomponenten einzeln eingebunden sowie sämtliche Systemzustände berücksichtigt und getestet werden. Dies führt bei der Neuinstallation zu langen Inbetriebnahmezeiten und bei Änderungen zu langen Stillstandszeiten sowie den entsprechenden Kosten für die Planung und Implementierung. Änderungen in der Betriebsphase sind besonders aufwendig, da das ursprüngliche Team der Inbetriebnahme oftmals nicht mehr zur Verfügung steht. Daher muss zuerst das bestehende System analysiert werden, um die notwendigen Steuerungsanpassungen zu planen. Für die Implementierung wird dann wiederum das gesamte System getestet [Nie-2010, S. 18ff.].

Sowohl kleinskalige Fördertechnik als auch MFS werden in zukünftigen Logistiksystemen, die Betreiber adaptiv auf neue Anforderungen anpassen können, gebraucht. Insbesondere MFS sehen derzeit eine aufwandsarme Anpassung der Materialflusssteuerung nicht vor. Die Gestaltung der zukünftigen Materialflusssteuerung von MFS steht daher im Fokus dieser Arbeit.

## 1.2 Adaptive automatisierte Materialflusssysteme

Analog zu adaptiven Produktionssystemen sind adaptive Materialflusssysteme (aMFS) in der Lage auf Änderungen zu reagieren und sich den geänderten Anforderungen aufwandsarm anzupassen. aMFS sind eine Steigerung von flexiblen MFS. Flexible MFS reagieren auf Veränderungen innerhalb vordefinierter Grenzen und Szenarios, während aMFS auch auf ungeplante Änderungen reagieren können [Wil-2006, S. 20f.]. Eine Möglichkeit aMFS zu realisieren ist die funktionsorientierte Modularisierung der Hard- und Software [Wil-2006, S. 29ff.]. Hierbei wird das aMFS in einzelne, unabhängige Module unterteilt. Die Module verfügen über ihre eigene Hard- und Software und sind somit in der Lage eigenständig Funktionen auszuführen, wie z. B. den Transport einer TE von einem Moduleingang zu einem Modulausgang. Dem aMFS können Module hinzugefügt, entfernt oder ausgetauscht werden, wodurch sich das Layout des aMFS adaptiv auf die aktuellen Materialflussanforderungen anpassen

lässt, wie in Abbildung 1-3 schematisch gezeigt. Ein zentraler Aspekt der Modularisierung ist die Software. Die Steuerung von konventionellen MFS ist in der Regel hierarchisch aufgebaut, läuft zentral auf einer speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) und ist speziell auf die im MFS verbauten Komponenten und Aufgaben des MFS ausgelegt. aMFS lösen die zentrale, hierarchische Steuerungsarchitektur auf und verteilen die Software auf die Module, die in der Lage sind, miteinander zu kommunizieren und zu kooperieren. aMFS reduzieren mit diesem Ansatz die Komplexität der Software und vereinfachen die Konfiguration nach Änderungen [Dil-1991].

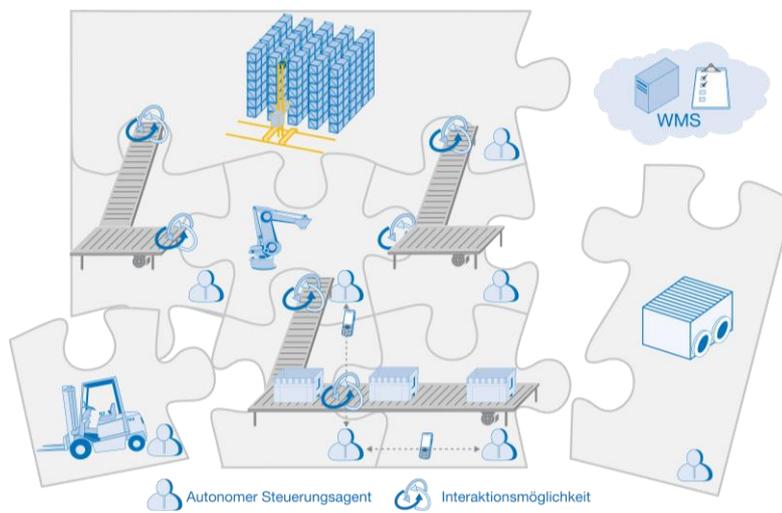


Abbildung 1-3: Schematische Darstellung eines aMFS, zu dem Module hinzugefügt, entfernt oder geändert werden können und das über standardisierte Schnittstellen kommuniziert.

Diese Arbeit definiert Module von aMFS als abgekapselte Einheiten, welche vordefinierte Funktionen ausführen können. Zu den vordefinierten Funktionen zählt neben dem Transportieren beispielsweise das Identifizieren. Ein Modul verfügt dabei über das notwendige Wissen und die Software, um die Werte der zugewiesenen Sensoren auszulesen, die Hardware zu steuern und mit anderen Modulen oder übergeordneten Systemen zu kommunizieren. Eine Grundvoraussetzung von aMFS sind standardisierte Software-Schnittstellen und die Beschreibung der Eigenschaften [Aic-2016]. Somit sind die Module eines aMFS in der Lage, sich nach der Aktivierung zu verbinden, Informationen auszutauschen, zu konfigurieren und den Materialfluss zu steuern.

### 1.3 Problemstellung und Zielsetzung

MFS setzen sich aus einzelnen Komponenten zusammen, die der Planer schon heute nach den kundenspezifischen Anforderungen flexibel miteinander kombiniert. Einer

zunehmenden Automatisierung von Materialflüssen, auch für Szenarien mit vielen Änderungen, durch MFS stehen somit die hohen Entwicklungs- und Änderungsaufwände für eine anlagenindividuelle Materialflusststeuerung entgegen.

Für die Automatisierung von Materialflüssen in adaptiven Produktions- und Logistiksystemen stellen aMFS ein geeignetes Mittel dar den Herausforderungen zu begegnen. Neben der Anpassbarkeit des Layouts ist auch die Reaktion auf wechselnde Materialflusstströme in einem bestehenden Layout eine geforderte Eigenschaft von aMFS, die durch die Steuerung abgedeckt sein muss. Das Ziel einer adaptiven Steuerung für aMFS ist die Minimierung von Stillstandszeiten und des manuellen Implementierungsaufwands. Die minimale Stillstandszeit ist erreicht, wenn Änderungen zur Laufzeit der Steuerung erfolgen können und somit kein steuerungsbedingter Anlagenstillstand mehr auftritt. Der minimale manuelle Implementierungsaufwand ist erreicht, wenn keine Programmierung oder manuelle Parametrierung mehr notwendig ist. Die Steuerung von aMFS soll sich also automatisch und unverzüglich auf geänderte Systemanforderungen einstellen und bringt hierfür die folgenden Eigenschaften mit:

- **Skalierbarkeit:** Flexible Anpassung des aMFS Layouts an die aktuellen Systemanforderungen.
- **Selbstkonfiguration:** Automatisches Anstoßen und Durchführen der Änderung von Einstellungen.
- **Anpassung an Materialflusanforderungen:** Selbstständiges Erkennen von geänderten Materialflusanforderungen wie Durchsatz oder Richtung der Materialflusstströme und Anpassen der Materialflusststeuerung.

Die Hardware von MFS und deren Schnittstellen sind schon heute stark modularisiert, um die Komponenten in verschiedenen MFS einzusetzen. Für die Software ist dies allerdings noch nicht der Fall. Zwar gibt es diverse Methoden und Werkzeuge, die die Erstellung der anlagenindividuellen Software teilautomatisieren, aber jede Änderung bedarf nach wie vor manueller Schritte zur Änderung des bestehenden Programms und einen Anlagenstillstand für das Aufspielen und Testen des geänderten Programms.

Erste Ansätze im Bereich der aMFS betrachten Systeme, die aus vordefinierten Komponenten bestehen. Die Steuerung ist in der Lage, neue Layouts selbst zu konfigurieren und sich auf veränderte Materialflusanforderungen einzustellen, allerdings dürfen nur die vordefinierten Komponenten eingesetzt werden. aMFS sollen aber analog zu derzeitigen MFS aus verschiedenen Komponenten, die individuelle Fähigkeiten für das aMFS mitbringen, bestehen und auch in Zukunft aufwandsarm um neue Komponenten erweitert werden, deren zukünftige Fähigkeiten zum Zeitpunkt der Inbetriebnahme

noch gar nicht bekannt sind. Die Steuerung von aMFS muss daher in der Lage sein, solch heterogen aufgebaute aMFS zu beherrschen und ein breites Aufgabenspektrum abzudecken, um ein aMFS in verschiedenen Einsatzszenarien zu steuern. Neben der automatischen Steuerung soll der Bediener eines MFS in der Lage sein, die Materialflüsse nachzuvollziehen und manuell eingreifen zu können.

Eine zentrale Herausforderung ist dabei die Berücksichtigung von gegenseitigen Abhängigkeiten von Transporten. Insbesondere in großen aMFS bestehen vielfältige Abhängigkeiten zwischen Transporten. Eine Abhängigkeit besteht beispielsweise, wenn Transporte dieselbe Komponente verwenden möchten und somit die Nutzung koordinieren müssen. In MFS können die Abhängigkeiten durch die vorausschauende Entwicklung eines geeigneten Layouts minimiert oder gar vermieden werden. aMFS entwickeln sich hingegen evolutionär, so dass die Berücksichtigung von gegenseitigen Abhängigkeiten eine größere Rolle spielt. Zusätzlich sind aMFS ständig Änderungen unterworfen, so dass sich die auftretenden Abhängigkeiten mit der Zeit verändern. Daher besteht eine zentrale Herausforderung in der Gestaltung einer Steuerung von aMFS die gegenseitigen Abhängigkeiten zwischen Transporten in der Planung von Materialflüssen zu berücksichtigen. Diese Arbeit soll unter anderem eine Antwort darauf geben, welche Abhängigkeiten in einem aMFS auftreten und wie diese in der Materialflussplanung berücksichtigt werden können.

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

Zur Erreichung der vorher beschriebenen Zielstellung ist die Arbeit nach der in Abbildung 1-4 gezeigten Struktur aufgebaut. Kapitel 2 führt zunächst die Grundlagen ein, auf die diese Arbeit immer wieder zurückgreift. Hierzu gibt das Kapitel einen Überblick über die Aufgaben und Gestaltung von Materialflusssystemen sowie einer Agentensteuerung. Anschließend widmet sich ein Abschnitt intensiv dem Thema Wegfindung in verschiedenen Arten von Netzwerken und ein weiterer Abschnitt beleuchtet das Thema Durchsatzberechnung in aMFS.

Kapitel 3 zeigt bestehende Lösungen zur Steuerung von adaptiven Systemen im Bereich der Produktion und Logistik auf. Dabei diskutiert das Kapitel die Grenzen der bestehenden Lösungen aus dem Bereich der Logistik und die Möglichkeit, Lösungen aus dem Bereich der Produktion für MFS zu adaptieren. Aus dem hieraus definierten Handlungsbedarf folgt die Formulierung der Forschungsfrage für diese Arbeit. Aus Kapitel 3 folgt, dass kein bestehendes System in der Lage ist, die formulierte Forschungsfrage zu beantworten. Daher wird in dieser Arbeit ein geeignetes System entwickelt.

Die Anforderungen an die Systemarchitektur, an die Gestaltung und an die Steuerung der Module sowie an die Materialflusssteuerung definiert Kapitel 4.

Kapitel 5 entwickelt auf Basis der Anforderungen eine mögliche Systemarchitektur. In diesem Zusammenhang erfolgt die Definition von autonomen Modulen, der Aufbau des Agentensystems und die Beschreibung der Schnittstellen zu externen Systemen.

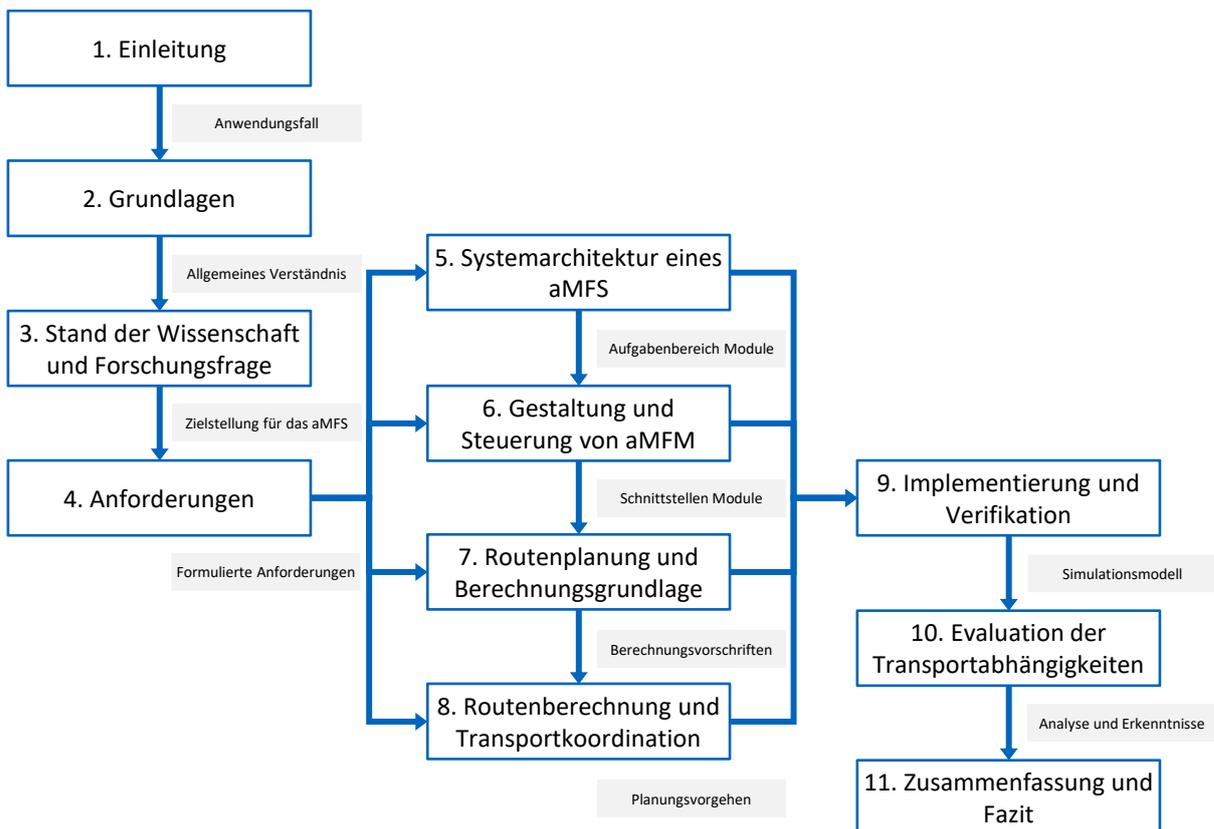


Abbildung 1-4: Aufbau der Arbeit mit dem zusammengefassten Ergebnis der Kapitel.

Module mit Materialflussfähigkeiten bilden die Grundlage eines aMFS, auf der eine Materialflusssteuerung aufbaut, die in der Lage ist, gegenseitige Abhängigkeiten zwischen Transporten zu berücksichtigen. Kapitel 6 beschreibt daher den Entwicklungsprozess eines Moduls, die Modellierung der Fähigkeiten, den Ablauf der Selbstkonfiguration und die interne Koordination von Transporten innerhalb eines Moduls.

Kapitel 7 widmet sich dann der Planung von Transporten in aMFS unter Berücksichtigung der gegenseitigen Abhängigkeiten. Hierfür werden zunächst verschiedene Routingkonzepte aus der Literatur und aus dem Bereich der Telekommunikationsnetze miteinander verglichen und das Konzept der semi-statischen Routen ausgewählt. Wissensgrundlage für die Routingkonzepte stellt die Netzwerktopologie mit Eigenschaften wie der Transportzeit oder Kapazitäten dar. Daher betrachtet das Kapitel

ebenfalls die Ermittlung der Topologie-Eigenschaften, die sich auch in Abhängigkeit der Transporte verändern. Einen wesentlichen Einfluss auf die Kapazität eines Moduls haben bidirektionale Bereiche, in denen TE in verschiedene Richtungen gefördert werden und nicht ausweichen können. Aufgrund des großen Einflusses auf die Kapazität umfasst der letzte Abschnitt die Entwicklung von Berechnungsvorschriften für solche Bereiche in aMFS.

Aufbauend auf den entwickelten Berechnungsvorschriften beschreibt Kapitel 8 den Ablauf der Routenberechnung und die Einrichtung von semi-statischen Routen in einem aMFS. Neben der Einrichtung von neuen semi-statischen Routen betrachtet das Kapitel ebenfalls die Möglichkeit der nachträglichen Optimierung. Zusätzlich zur Routenplanung bedarf es auch einer Koordination der Transporte innerhalb eines aMFS, die die Abhängigkeiten zwischen verschiedenen Transporten berücksichtigt. Daher beschreibt das Kapitel die Adaptierung von bewährten Konzepten für den Einsatz in aMFS mit semi-statischen Routen.

Die Evaluation der Arbeit basiert auf einem Simulationsmodell, das die Grundlage verschiedener Simulationsstudien bildet. Kapitel 9 beschreibt den Aufbau des Simulationsmodells, die grundsätzliche Funktionsweise und die Verifikation. In Kapitel 10 sind die durchgeführten Simulationsstudien beschrieben. Die Simulationsstudien evaluieren die Berechnungsvorschriften und Vorgehensweisen zur Berücksichtigung von gegenseitigen Abhängigkeiten zwischen Transporten in der Planungsphase. Die Ergebnisse der Simulationsstudien dienen als Basis, um die Eignung der in dieser Arbeit entwickelten Berechnungsvorschriften und Vorgehensweisen zu diskutieren sowie Grenzen aufzuzeigen. Das abschließende Kapitel 11 fasst die wesentlichen Schritte der Arbeit zusammen und zieht ein Fazit, woraus sich der weitere Forschungsbedarf ableitet.

## **1.5 Abgrenzung zu anderen wissenschaftlichen Arbeiten im Projekt iSiKon**

Diese Arbeit entstand aus dem Forschungsprojekt „Gesteigerte Flexibilität in heterogen aufgebauten Materialflusssystemen auf Basis intelligenter Softwareagenten in selbstkonfigurierender Fördertechnik“ (iSiKon). Das Projekt wurde durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördert (Projektnummer GU 427/25-1 und VO 937/24-1). iSiKon wurde vom Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik (fml) und dem Lehrstuhl für Automatisierung und Informationssysteme (AIS) der Techni-

schen Universität München gemeinsam bearbeitet. Ziel des Projektes war die Entwicklung von intelligenten Softwareagenten, die einzelne Fördertechnikeinheiten repräsentieren und eine Selbstkonfiguration sowie Steuerung von aMFS ermöglichen.

Diese Arbeit fokussiert sich auf die Steuerung von Transporten in einem aMFS. Zur Beschreibung der spezifischen Transporteigenschaften von einzelnen Modulen wird ein Verfahren und der Ablauf der Konfiguration eingeführt. Im weiteren Verlauf werden für die Transportkoordination Berechnungsvorschriften zur Ermittlung des Einflusses von Abhängigkeiten zwischen Transporten auf die Systemleistung erarbeitet sowie die Anwendung der Vorschriften in der Planungsphase von Transporten. Abschließend erfolgt die Evaluation durch eine Materialflusssimulation.

In den Arbeiten von Daniel Regulin wurde die automatische Erkennung, Registrierung und Etablierung der Kommunikation von neuen Modulen in einem aMFS mit einem EtherCAT Feldbussystem behandelt [Reg-2015]. Zusätzlich wurde die Modellierung des Wissens eines Moduls und der Austausch des Wissens zwischen Modulen betrachtet [Reg-2016].

Juliane Fischer bearbeitete neben der Konzeptionierung und Implementierung der Softwareagenten auf SPS mit IEC 61131-3 zur Ansteuerung der einzelnen Module vor allem die Themen Wiederverwendung, einheitliche Schnittstellen und Funktionalitätskapselung in aMFS [Fis-2017] sowie die Visualisierung von Entscheidungen von Agenten zur Nachvollziehbarkeit durch einen Bediener [Fis-2020].



## 2 Grundlagen

---

Dieses Kapitel widmet sich der Beschreibung der allgemeinen Grundlagen von MFS, der Steuerung, der Routenberechnung und der analytischen Berechnung von Durchsätzen. Die Arbeit greift an verschiedenen Stellen immer wieder auf diese Grundlagen zurück.

### 2.1 Materialflusssysteme

Der folgende Abschnitt definiert allgemein die Aufgaben von Materialflusssystemen und den Einsatz von MFS. MFS fallen unter den Oberbegriff der automatisierten Materialflusstechnik und setzen sich aus den Elementen Fördertechnik und Steuerungstechnik zusammen, die in den folgenden Abschnitten eingeführt werden.

#### 2.1.1 Aufgaben von Materialflusssystemen

Die Grundaufgabe der Logistik definiert *Gudehus* als „Effizientes Bereitstellen der geforderten Mengen benötigter Objekte in der richtigen Zusammensetzung zur rechten Zeit am richtigen Ort.“ [Gud-2011, S. 3]. Die Unternehmenslogistik teilt sich in innerbetriebliche (Intralogistik) und außerbetriebliche (Extralogistik) auf. Die Extralogistik verbindet unterschiedliche Standorte während die Intralogistik unterschiedliche Bereiche an einem Standort oder in einer Halle verbindet, wie z. B. den Wareneingang mit dem Lager [Gud-2011, S. 7f.].

In der Intralogistik führen MFS nicht nur einen reinen Transport aus, sondern übernehmen zusätzliche Aufgaben wie das Verteilen, Sammeln, Sortieren und Puffern. MFS verteilen einen eingehenden Materialflussstrom auf verschiedene Strecken oder Senken, um z. B. Überlastungen auf einer Strecke zu vermeiden oder unterschiedliche Aufgaben auszuführen. Das Sammeln führt verschiedene Materialflussströme zusammen. Die Kommissionierung bildet aus unterschiedlichen TE durch eine Veränderung der Anordnung eine neue TE, wofür das Sammeln der zu kommissionierenden TE erforderlich ist [Hom-2007, S. 120f.]. Das Sortieren bildet aus unterschiedlichen TE eine Teilmenge, die gleiche Merkmale aufweist. Materialflusssysteme in Versandzentren sortieren TE beispielsweise nach Postleitzahlen oder Regionen. Das Puffern bezeichnet das temporäre Lagern (Zwischenlagern) einer TE, um Arbeitsschritte in einem Materialflusssystem voneinander zu entkoppeln [Arn-2009, S. 225].

Die Intralogistik verwendet oftmals Materialflusstechnik, wie z. B. Fördertechnik, Lagertechnik, Kommissioniertechnik, um den innerbetrieblichen Materialfluss zu unterstützen. Eine Automatisierung der Materialflusstechnik ermöglicht eine Erhöhung der Systemleistung wie z. B. den Durchsatz, die Steigerung der Qualität (Einhaltung von Terminen), die Steigerung der Wirtschaftlichkeit und die Entlastung von Personal (Übernahme von uniformen Tätigkeiten) [Hah-2006, S. 106].

### 2.1.2 Fördertechnik

Im Fokus dieser Arbeit stehen MFS für Stückgüter, die einen Transport mit technischen Hilfsmitteln realisieren. Stückgüter sind einzelne Objekte wie z. B. Paletten, Behälter oder Kartons im Gegensatz zu Schüttgütern wie z. B. Sand oder Erze. Die TE von Stückgütern ist entweder direkt das Transportgut (z. B. Karton) oder ein Ladehilfsmittel (z. B. Palette). Der Transport von TE erfolgt durch Fördermittel, die innerhalb eines definierten Bereichs (z. B. in einem Werk) den Materialfluss durchführen. Der Fördervorgang ist entweder stetig oder unstetig (aussetzend, intermittierend) [Jün-1989b, S. 192f.]. Ein stetiger Transport liegt beispielsweise bei einem Förderband vor, das Stückgüter diskret transportiert. Der kontinuierliche Transport setzt voraus, dass die Annahme oder Abgabe von Transportgütern während des Betriebs erfolgt und nahezu jederzeit möglich ist, wie in Abbildung 2-1 links am Beispiel eines Bandförderers schematisch dargestellt. Stetige Fördervorgänge werden durch ortsfeste Systeme ausgeführt.

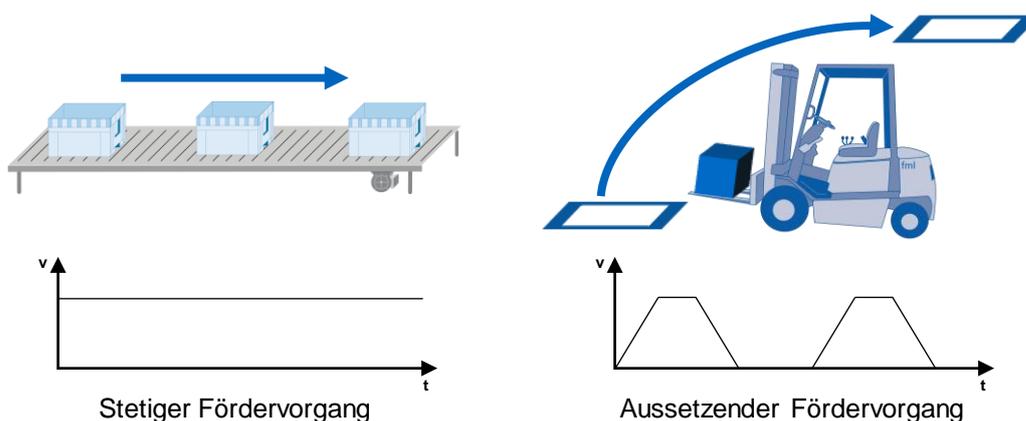


Abbildung 2-1: Beispiele für einen stetigen und aussetzenden Fördervorgang mit schematischem Geschwindigkeitsverlauf.

Ein Gabelstapler transportiert Stückgüter hingegen aussetzend (unterbrochener Fördergutstrom), da nach der Abgabe eines Stückgutes eine Leerfahrt sowie die Aufnahme und Abgabe eines Transportgutes im Stillstand erfolgt. Hierdurch stellt sich kein

kontinuierlicher Fluss ein, wie Abbildung 2-1 rechts dargestellt. Für unstetige Fördervorgänge kommen sowohl ortsfeste als auch ortsungebundene Systeme zum Einsatz. Die Auswahl eines Fördermitteltyps ist abhängig von den Dimensionen der TE, der Beschaffenheit der TE (z. B. Auflagefläche, Oberfläche, etc.), der Länge der Förderstrecke, dem Verlauf der Förderstrecke (z. B. Neigung), den räumlichen Gegebenheiten (z. B. Platz auf dem Boden oder an der Hallendecke), Belastungen auf die TE (z. B. Stoßbelastungen), den Durchsatzanforderungen, Hygieneanforderungen, Temperaturanforderungen und funktionalen Anforderungen (z. B. Sortieren und Ausschleusen) [Jün-1989b, S. 205ff.; Aßm-2019, S. 6ff.].

## Stetigförderer

Stetige Fördermittel liegen in verschiedenen Ausprägungen vor und besitzen die Gemeinsamkeit, dass sie ortsgebunden sind. Layoutänderungen bedingen daher oftmals eine Veränderung der Mechanik und Steuerung. Abbildung 2-2 zeigt eine Kategorisierung der Stetigförderer in flurgebunden, flurfrei und vertikal mit Beispielen.



Abbildung 2-2: Übersicht an verschiedenen stetigen Fördermitteltypen nach [Fot-2019, S. 47] und [VDI-4440] (Bilder: GEBHARDT Fördertechnik GmbH, ROFA INDUSTRIAL AUTOMATION AG und NERAK GmbH Fördertechnik).

In der Regel kommen stetige Fördermittel zum Einsatz, um große Mengen an Stückgütern oder Schüttgütern auf gleichbleibenden und über lange Distanzen zu fördern [Jün-1989b, S. 201ff.]. Flurgebundene Fördermittel sind fest mit dem Boden verbunden oder eingelassen. Hierunter fallen beispielsweise Bandförderer, deren Stützen mit dem Boden verbunden sind, oder Elektrotragebahnen, deren Schienen auf dem Boden montiert oder im Boden eingelassen sind. Flurfreie Fördermittel sind an der Hallendecke oder Stützen befestigt. Der Fördervorgang erfolgt in der Regel oberhalb der Arbeitsebene in einer Halle, so dass keine Beeinträchtigung der Arbeitsabläufe auf dem Boden erfolgt. Bei vertikalen Fördermitteln erfolgt die Förderung über verschiedene Ebenen.

### Unstetigförderer

Unstetigförderer liegen als ortsfeste sowie frei geführte oder verfahrbare Systeme vor. Unstetige Fördermittel liegen ebenfalls in flurgebundener, flurfreier oder vertikaler Ausführung vor, wie in Abbildung 2-3 für einige Beispiele gezeigt.

| Flurgebunden  | Flurfrei   | Vertikal   |
|---|--|--|
| <p><b>Gleislose frei verfahrbare Förderer</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Schlepper</li> <li>▪ Wagen</li> <li>▪ Gabelhubwagen</li> <li>▪ Gabelstapler (Schubmaststapler, Hochregalstapler, Seitenstapler, etc.)</li> <li>▪ Fahrerloses Transportsystem</li> </ul>  <p><small>Bild: Volker_Strey / Jungheinrich AG</small></p> | <p><b>Gleisgebundene Förderer</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Regalbediengerät</li> <li>▪ Kurvengängiges Regalbediengerät</li> <li>▪ Umsetzer</li> <li>▪ Querverschiebewagen</li> </ul>  <p><small>Bild: GEBHARDT Fördertechnik GmbH</small></p> | <p><b>Hängeförderer</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Elektrohängebahn (mit Einzelantrieb)</li> <li>▪ Power-and-Free Förderer</li> </ul>  <p><small>Bild: ROFA INDUSTRIAL AUTOMATION AG</small></p> |
| <p><b>Ortsgebundene Förderer</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Drehtisch</li> </ul>  <p><small>Bild: GEBHARDT Fördertechnik GmbH</small></p>  | <p><b>Vertikalförderer</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Aufzug</li> <li>▪ Schrägaufzug</li> <li>▪ Etagenförderer</li> <li>▪ Hubtisch</li> </ul>  <p><small>Bild: GEBHARDT Fördertechnik GmbH</small></p>  | <p><b>Kran</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Brückenkran</li> <li>▪ Portalkran</li> <li>▪ Säulendrehkran</li> </ul>  <p><small>Bild: ABUS Kransysteme GmbH</small></p>                              |

Abbildung 2-3: Übersicht an verschiedenen unstetigen Fördermitteltypen (Bilder: Jungheinrich AG, GEBHARDT Fördertechnik GmbH, ROFA INDUSTRIAL AUTOMATION AG und ABUS Kransysteme GmbH).

Die Spielzeit zur Durchführung eines Transportes setzt sich aus verschiedenen Spielzeitanteilen zusammen, wie der Spielzeit für eine Leerfahrt (Anfahrt), Aufnahme einer TE, Transport einer TE und Abgabe einer TE. Der Einsatz von Unstetigförderern erfolgt meist bei kleinen bis mittleren Transportmengen, die an verschiedenen Orten aufgenommen oder abgegeben werden [Jün-1989b, S. 217ff.].

### 2.1.3 Steuerung

Die Steuerung der Fördertechnik erfolgt entweder manuell, mechanisch oder automatisch. Automatisierte Steuerungssysteme führen den Materialflussprozess vollständig automatisiert durch, ohne dass es den Eingriff einer Person bedarf. Personen überwachen lediglich den automatisierten Prozess und greifen bei Störungen ein. In einem automatisierten Steuerungssystem ist auch Integration von manuellen Arbeitsplätzen möglich. Der Mitarbeiter am manuellen Arbeitsplatz besitzt hierbei keine Bedienungs-funktion. Das Materialflusssystem fährt beispielsweise automatisch Behälter an einen Kommissionierarbeitsplatz, an dem ein Mitarbeiter Waren entnimmt und eine manuelle Quittierung ausführt [Jün-1998, S. 141f.].

Die Steuerung von MFS basiert meist auf einer hierarchischen Steuerungsarchitektur, die das MFS in mehrere Bereiche unterteilt. Ein Bereich führt selbstständig Funktionen aus und steht in einer hierarchischen Beziehung mit anderen Teilbereichen. Die Kommunikation erfolgt über definierte Schnittstellen mit der übergeordneten Bereichssteuerung oder untergeordneten Bereichssteuerungen. Eine hierarchische Steuerung für MFS besteht somit aus mehreren Ebenen, wodurch sich ein pyramidenförmiger Aufbau der Steuerung ergibt [Jün-1998, S. 137ff.; DIN-19237; Lau-1999, S. 39f.].

Der Vorteil einer hierarchischen Steuerungsstruktur liegt in der Kapselung einzelner Funktionen innerhalb eines Bereichs, wodurch die Komplexität bei der Erstellung der Steuerung reduziert wird. Zusätzlich ist eine einfache Aufteilung von Bereichen und Ebenen auf verschiedene Typen und Einheiten an Steuerungshardware möglich, die passgenau die Anforderungen in Bezug auf Rechenleistung, Kommunikation, Reaktionszeit oder andere Kriterien erfüllen. Allerdings ist eine Erweiterung oder Änderung der Steuerung im Zuge von neuen Aufgaben oder eines geänderten Layouts des MFS aufwendig, da die Architektur und Beziehungen der Bereiche zueinander angepasst werden müssen. Daher weisen heutige hierarchische Steuerungen nur eine geringe Flexibilität gegenüber Änderungen auf [Gün-2010a, S. 43; Sch-2009, S. 160; Hom-2005, S. 1]. Wobei hierarchische Steuerungsstrukturen im Zuge der zunehmenden Flexibilisierung von Systemen und einer Vernetzung der unteren Ebenen um neue Strukturen ergänzt werden [Vog-2009].

Die Anzahl der Ebenen und Aufgabenzuweisung hängt bei einer hierarchischen Steuerungsarchitektur vom Anwendungsfall und dem Planer ab. Auch für MFS existieren verschiedene Konzepte [Krä-2002, S. 32f.]. Am Beispiel der von *Kuhn* definierten hierarchischen Steuerung für MFS, ist die Verteilung der Aufgaben auf die verschiedenen Hierarchieebenen beispielhaft erläutert [Kuh-1989, S. 125ff.]. Die hierarchische Steuerungsarchitektur besteht aus fünf Ebenen und ist in Abbildung 2-4 gezeigt.

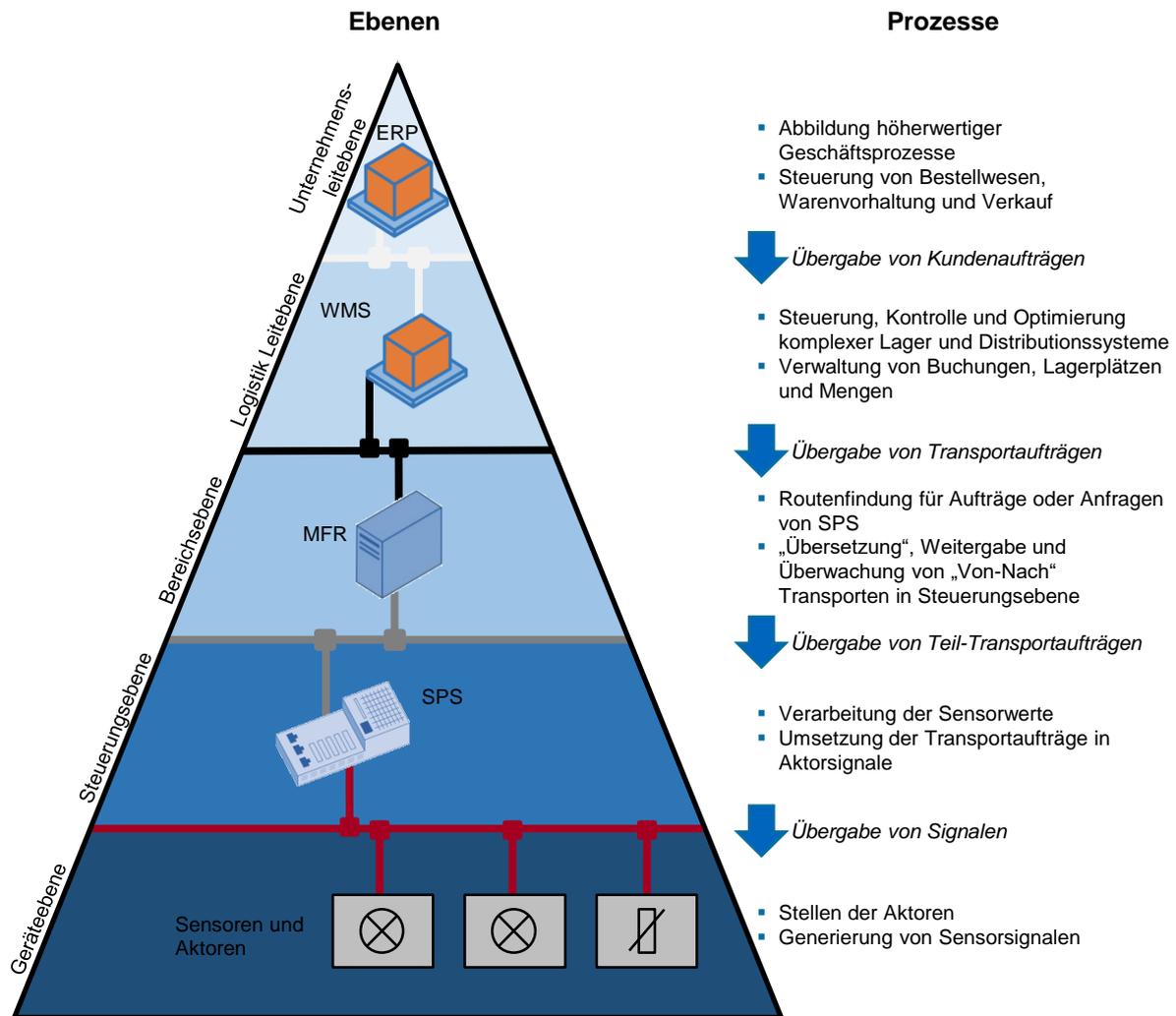


Abbildung 2-4: Schematisches Ebenen-Modell der Materialflussautomatisierung in der Logistik in Anlehnung an [Fot-2019, S. 154] mit einer Aufgabenschreibung nach [Hom-2010, S. 224ff.].

Die unterste Ebene ist die Geräteebene (Feldebene), gefolgt von der Steuerungsebene, der Bereichsebene (Materialflussebene), Logistik-Leitebene (WMS) und der Unternehmensleitebene als oberste Steuerungsebene. In Abbildung 2-4 sind den Ebenen jeweils repräsentative Steuerungssysteme in einem MFS zugewiesen, welche im Folgenden erläutert werden [Jün-1998, S. 143ff.; Hom-2007, S. 224ff.; VDM-15276; Lau-1999, S. 39f.].

Auf der Feldebene sind die Sensoren und Aktoren angesiedelt, die Signale zum Stellen eines Aktors (z. B. Motor anschalten) empfangen oder Sensorsignale ausgeben (z. B. Lichtschranke detektiert ein Objekt).

Eine Ebene über der Feldebene befindet sich die Steuerungsebene, die Signale der Sensoren empfängt sowie Signale für Aktoren generiert und somit die Transportkoordination auf einem Fördermittel oder die Übergabe zwischen zwei Fördermitteln ausführt. Die Steuerungsebene detektiert über die ausgelesenen Sensorsignale und Interpretation der Aktorsignale (z. B. Dauer des Motorbetriebes) an welcher Stelle sich eine TE befindet. Nach der Detektion einer TE erfolgt die Bestimmung der nächsten Aufgabe für eine TE und Generierung der Aktorsignale. Hierbei wird auch die Position der anderen TE im Verantwortungsbereich der Bereichssteuerung berücksichtigt. Die Steuerungsebene generiert somit die Aktorsignale zur Ausführung eines Transportes. Die Steuerungsebene reagiert zeitnah auf die Sensorsignale, um die an das MFS gestellten Sicherheitsanforderungen zu erfüllen. Dafür eignen sich zyklisch arbeitende speicherprogrammierbare Steuerungen (SPS), die über eine entsprechende Steuerungshardware verfügen und nach dem IEC 61131-3 Standard programmiert sind [Joh-2009, S. 14f.]. Die Steuerung eines MFS läuft bei kleineren Anlagen auf einer SPS und bei größeren Anlagen auf mehreren SPS, die jeweils für einen Bereich zuständig sind.

Die Aufgaben für eine TE erhält die Steuerungsebene vom Materialflussrechner (MFR) auf der überordneten Bereichsebene. Der MFR koordiniert den Materialfluss durch das System und gibt die Route für eine TE vor. Der MFR legt beispielsweise für jede Abzweigung fest, in welche Richtung die Abzweigung eine TE weiterleitet. Die Routen durch das Materialflusssystem sind meist fest programmiert und verfügen über vorher definierte Ausweichstrecken im Falle einer Störung. Der MFR führt vorrausschauende planerische Aufgaben aus. Neben der Planung und Überwachung der Transportaufträge in einem Materialflusssystem ist die Anlagenvisualisierung und das Human Machine Interface beim MFR angesiedelt.

Auf der Logistik-Leitebene ist das Warehouse Management System (WMS) angesiedelt. Das WMS übernimmt strategische Aufgaben und verfügt über einen Überblick über das gesamte Logistiksystem, verwaltet die Bestände, verarbeitet Buchungen und generiert Arbeitsaufträge. Ein Logistiksystem verfügt beispielsweise neben einem MFS noch über ein automatisiertes Lager. Für jeden Bereich (Teilsystem) generiert das WMS Aufgaben. Für den MFR eines MFS generiert das WMS die Transportaufträge. Das WMS erhält beispielsweise den Auftrag verschiedene Artikel zu kommissionieren. Das WMS entscheidet aus welchem Lagerort der Artikel für die Kommissionierung kommt und in welcher TE sich der Artikel befindet. Hieraus leitet das WMS

den Auslagerauftrag für das Lager ab und den Transportauftrag vom Lager an einen definierten Kommissionierarbeitsplatz, der an ein MFS angeschlossen ist.

Das WMS erhält seine Arbeitsaufträge von der Unternehmensebene, auf der das Enterprise Resource Planning (ERP) System eines Unternehmens angesiedelt ist. Das ERP verwaltet Kundenaufträge und generiert hieraus wiederum Aufträge für das Logistiksystem auf Basis der definierten Geschäftsprozesse.

## **2.2 Steuerungskonzepte**

Im Folgenden ist ein kurzer Abriss der für diese Arbeit relevanten Steuerungs- und Kommunikationskonzepte beschrieben sowie die Beschreibung einer Wissensbasis.

### **2.2.1 Agentensteuerung**

Herkömmliche hierarchische Steuerungsarchitekturen basieren auf einer zentralen Steuerung und erfüllen oftmals nicht die Anforderungen flexibler und adaptiver automatisierter Maschinen und Anlagen, wie z. B. die Koordination der Funktionen und Kommunikation in einer verteilten Infrastruktur oder der Funktionsadaption zur Laufzeit durch Hinzufügen neuer Komponenten oder Aufspielen neuer Softwareversionen [Epp-2013, S. 96f.]. Daher wurden dezentrale Steuerungskonzepte entwickelt, die aus eigenständigen Akteuren bestehen. Die Akteure sind autonom gestaltet, verfolgen jeweils ein definiertes Ziel und sind in der Lage miteinander zu kommunizieren. Für die autonomen Akteure wurde der Begriff der Softwareagenten eingeführt [Hew-1977, S. 327ff.; Mae-1994] und in der VDI/VDE Richtlinie 2653 Begriffe und Anwendungszwecke definiert [VDI-2653]. Durch die Zusammenarbeit mehrerer identischer oder unterschiedlicher Softwareagenten in einem System, kann das System als Ganzes ein globales intelligentes Verhalten aufweisen. In diesem Fall spricht man von einem Multi-Agenten-System (MAS) [Woo-1995, S. 115ff.; Lei-2013, S. 2360].

Softwareagenten sind insbesondere für komplexe Aufgabenstellungen geeignet, da hierdurch die Ziele, Funktionalitäten und Entscheidungsprozesse auf autonome Einheiten abgekapselt und aufgeteilt werden. Es besteht nur eine geringe strukturelle Kopplung zwischen den Softwareagenten. Die Systemstruktur und das Systemverhalten bilden sich automatisch in Abhängigkeit der Anforderungen heraus, so dass sich die Softwareagenten flexibel auf die Aufgabenstellung anpassen [VDI-2653, S. 6ff.]. Der Einsatz von Softwareagenten empfiehlt sich z. B., wenn verschiedene voneinander abhängige Teilsysteme existieren, sich die Struktur des Systems während der

Laufzeit ändert, sich die Funktionen des Systems während der Laufzeit ändern oder die Abläufe in einem System Änderungen unterworfen sind. Der Einsatz von MAS, die sich selbst organisieren können, ist daher für MFS geeignet [Lei-2019]. Der Nachteil von Agenten besteht darin, dass das Verhalten eines Agentensystems nicht immer vorherbestimmbar ist [VDI-2653, S. 8f.].

Die Foundation for Intelligent Physical Agents (FIPA) bildete sich 1996, um Standards für MAS zu entwickeln. Die FIPA definierte in der Folge Standards für die Kommunikation, den Nachrichtentransport und die Agentenverwaltung, eine abstrakte Architektur und Anwendungen. Dabei stellen die Standards zur Kommunikation den Kern der Arbeit dar [Fou-2004]. Auf Basis der FIPA Standards und objektorientierten Programmiersprachen wurden zunehmend Agentenplattformen angeboten, die Entwickler bei der Erstellung und Ausführung von Agentensystemen unterstützen, wie z. B. JADE, FIPA-OS und viele weitere [Lei-2013, S. 2361f.]. Die Agentenplattformen stellen dem Entwickler eine domänenunabhängige Infrastruktur zur Verfügung, so dass sich der Entwickler auf die Umsetzung der Systemlogik fokussieren kann. Die Infrastruktur umfasst dabei beispielsweise eine nachrichtenbasierte Kommunikation, Interaktionsprotokolle für Aktionen zwischen Agenten, die Registrierung und das Auffinden von Diensten, Übersicht über den Agentenstatus und weitere Funktionen [Bel-2008, S. 1ff.].

Die Umstellung von bestehenden Steuerungssystemen auf flexiblere Steuerungssysteme, wie sie z. B. MAS ermöglichen, stellt eine große Herausforderung dar. Sogenannte Design Patterns unterstützen Entwickler bei der Einführung von neuen Steuerungskonzepten, indem sie z. B. Erfolgsfaktoren oder den abstrahierten Entwicklungsprozess für vergleichbare Problemstellungen beschreiben [Cru-2019].

### **2.2.2 Wissensbasis**

Um verschiedene Module in einem modular aufgebauten System gemeinsam zu verwenden, ist eine einheitliche Beschreibung der Module notwendig. Eine Wissensbasis enthält die Beschreibung von automatisierten Modulen oder Anlagen im Allgemeinen, wie z. B. den physischen Aufbau, Fähigkeiten oder Eigenschaften. Die Struktur der Wissensbasis ist in einem Meta-Modell festgelegt, welches in Abhängigkeit des Anwendungsfalls, der Anwendungsdomäne und weiterer Faktoren entwickelt wird [Mag-2011a, S. 2ff.].

Als Modellierungssprache kommt beispielsweise System Modeling Language (SysML) zum Einsatz. Durch SysML können die Strukturen, das Verhalten und weitere Eigenschaften in verschiedenen Domänen und Lebenszyklen für ein System abgebildet werden [Obj-2017, S. 35ff.].

## 2.3 Steuerung von Transporten in Netzwerken

Für die Steuerung und das Routing von Materialflüssen kann auf diverse Vorarbeiten aufgebaut werden, die im Folgenden beschrieben sind.

### 2.3.1 Einführung in die Graphentheorie

Mit Hilfe von Graphen lassen sich Netzwerke mathematisch beschreiben [Die-2017]. Die Komponenten eines MFS bilden ein Netzwerk und lassen sich als Graph modellieren, wie in Abbildung 2-5 links und Mitte gezeigt.

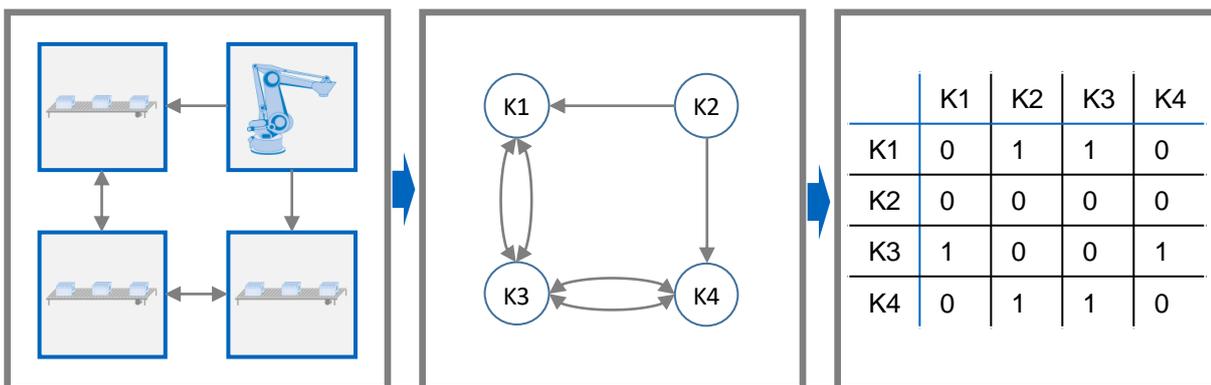


Abbildung 2-5: Modellierung eines MFS (links) in einem Graphen (Mitte) und einer Adjazenzmatrix (rechts).

Neben einer grafischen Darstellung lassen sich Graphen auch mit Hilfe einer Adjazenzmatrix beschreiben, wie in Abbildung 2-5 rechts gezeigt. In den Zeilen und Spalten stehen die Knoten des Graphs. Falls eine Kante zwischen zwei Knoten existiert, ist dies mit einem Eintrag in der Adjazenzmatrix dargestellt. Eine Dimension repräsentiert dabei die Startknoten und eine andere die Zielknoten. Sowohl Knoten als auch Kanten kann ein Wert zugeordnet werden. Für Transportnetzwerke wird einer Kante beispielsweise die Transportzeit vom Start- zum Zielknoten zugewiesen. Die Einträge der Adjazenzmatrix entsprechen in diesem Fall den Werten der Kanten.

### 2.3.2 Algorithmen zur Wegfindung

Graphen sind die Basis zur Bestimmung eines Wegs durch ein Netzwerk. Zu diesem Zweck stehen verschiedene Verfahren zur Verfügung, deren Funktionsweise und Anwendungsbereiche im Folgenden beschrieben werden. Grundsätzlich besitzen die Kanten ein Gewicht, das die Längen oder Kosten beschreibt, um vom Start- zum Zielknoten einer Kante zu gelangen. Die Verfahren zur Bestimmung eines kürzesten Weges liefern sowohl die Länge (Kosten) des kürzesten Weges als auch die Reihenfolge der zu durchlaufenden Knoten. Das Problem zur Findung eines kürzesten Weges lässt sich in folgende Typen unterteilen:

- SPP (Single Pair Shortest Problem): Findet einen kürzesten Weg von einem definierten Start- zu einem definierten Zielknoten im Graph.
- SSP (Single Source Shortest Path Problem): Findet jeweils einen kürzesten Weg von einem definierten Startknoten zu allen anderen Knoten im Graph.
- APSP (All Pairs Shortest Path Problem): Findet für jeden Knoten im Graph jeweils einen kürzesten Weg zu allen anderen Knoten im Graph.

Die Lösungen von SPP und SSP Problemen besitzen eine vergleichbare Komplexität und die Lösungen für SSP Probleme liefern auch Lösungen für SPP Probleme. Somit werden im Folgenden nur SSP und APSP Probleme betrachtet [Kru-2012, S. 169f.].

Der Algorithmus von Dijkstra löst SSP Probleme und findet somit jeweils einen kürzesten Weg von einem Startknoten zu allen anderen erreichbaren Knoten im Graph. Der Dijkstra Algorithmus setzt voraus, dass es keine negativen Kantengewichte gibt. Als Ergebnis des Dijkstra Algorithmus liegt für jeden Knoten die Entfernung vom Startknoten vor und der Vorgängerknoten [Dij-1959, S. 269ff.]. Der A\* Algorithmus kann als Erweiterung des Dijkstra Algorithmus angesehen werden. Der A\* Algorithmus wird den informierten Suchverfahren zugeordnet und verwendet zusätzlich eine Schätzfunktion. Anstatt den Knoten mit der kürzesten Entfernung vom Startknoten für den nächsten Berechnungsschritt zu wählen, wird der Knoten mit dem geschätzten kürzesten Weg zum Ziel identifiziert. Die Abschätzung kann beispielsweise durch die Berechnung der Luftlinie vom aktuellen Knoten zum Zielknoten erfolgen [Har-1968].

APSP Probleme lassen sich zwar durch die iterative Anwendung von SSP Algorithmen lösen, allerdings werden APSP Probleme durch APSP Algorithmen wie dem von Floyd and Warshall [Flo-1962, S. 345; War-1962, S. 11f.] oder dem in Bezug auf Laufzeit nochmals verbesserten Algorithmus von Johnson effizienter gelöst [Joh-1977, S. 1ff.]. Den beiden Algorithmen liegt das Prinzip zu Grunde, dass für einen bereits bekannten kürzesten Weg sich der kürzeste Weg zwischen zwei Knoten, die auf dem bekannten kürzesten Weg liegen, aus dem bereits bekannten Weg ergibt. Mit dieser Annahme

werden durch einen iterativen Vergleich alle kürzesten Wege für jeden Knoten zu jedem anderen Knoten in einem Graphen ermittelt.

Die oben beschriebenen Lösungen setzen voraus, dass zur Ermittlung eines Weges der gesamte Graph bekannt ist. Im Gegensatz dazu existieren Lösungen, die ohne einen globalen Graphen auskommen. Ein Beispiel hierfür ist der Bellmann-Ford Algorithmus, der zusätzlich mit negativen Kantengewichten arbeiten kann [For-1956]. Die Knoten kennen zu Beginn ihre direkten Nachbarknoten, besitzen also nur einen lokalen Graphen. Iterativ ermitteln die Knoten den Abstand zu ihren Nachbarknoten und teilen diese Information allen anderen Nachbarknoten mit. Für jeden Knoten wird vermerkt über welchen Nachbarknoten andere Knoten erreichbar sind und die dazugehörige Distanz. Ist derselbe Knoten über mehrere Nachbarknoten erreichbar, wird nur der Eintrag mit der kürzesten Distanz zum Knoten vermerkt. Die Anzahl der Iterationschleifen beträgt der Anzahl der Knoten im Graph minus eins. Als Ergebnis liegt an jedem Knoten die kürzeste Distanz zu jedem anderen Knoten im Graph vor und über welchen Nachbarn dieser zu erreichen ist.

### 2.3.3 Berücksichtigung von Verkehr in Transportnetzwerken

Die Ermittlung des schnellsten Wegs in einem Netzwerk hängt neben der Distanz oftmals auch von weiteren Faktoren ab, wie der Geschwindigkeit. Die Geschwindigkeit kann durch die Verwendung von Zeiten anstatt von Distanzen als Kantengewicht einfach berücksichtigt werden. Ein weiterer Faktor ist der Verkehr in einem Transportnetzwerk, der wiederum die Zeiten und damit die Kantengewichte beeinflusst. Die Planung des Verkehrs in einem Transportnetzwerk ermöglicht einen optimierten Fluss, der sich in kürzeren Transportzeiten oder höheren Durchsätzen bemerkbar macht. Der Zusammenhang zwischen dem Durchsatz pro Zeiteinheit und der durchschnittlichen Transportdauer in einem System wird durch *Little* nach (2-1) beschrieben [Joh-1961].

$$L = \lambda_A W \quad (2-1)$$

$L$  bezeichnet die erwartete Anzahl an Objekten, die sich gleichzeitig in einem System befinden,  $\lambda_A$  ist die erwartete Ankunftsrate mit der Objekte in ein System eintreten und  $W$  die durchschnittliche Transportdauer eines Objekts im System. Somit ergibt sich ein direkter Zusammenhang zwischen der Ankunftsrate und der durchschnittlichen Transportzeit in einem System. Je mehr Objekte sich gleichzeitig in einem System befinden und je kürzer die durchschnittliche Transportdauer ist, desto höher ist die Ankunftsrate. Allerdings behindern sich Objekte oftmals gegenseitig in einem System und führen somit zu einer höheren durchschnittlichen Transportdauer. Die Auflösung dieses Konflikts ist eine Aufgabe der Verkehrsplanung und -steuerung.

Die Verkehrsplanung im Straßenverkehr lässt sich zum einen in die Gestaltung der Verkehrswegenetze und Verkehrsanlagen [Loh-2011, S. 1ff.] sowie des Verkehrsmanagements unterteilen. Bei der Gestaltung von Verkehrswegenetzen werden entsprechend des Bedarfs der Verlauf und Typ von Straßen festgelegt [Loh-2011, S. 122ff.]. Somit wird bei der Gestaltung beispielsweise festgelegt, welche Knoten in einem Netzwerk existieren, welche Knoten miteinander verbunden sind und die Eigenschaften der Verbindungen. Das Verkehrsmanagement bietet die Möglichkeit, den Verkehr mittel- und kurzfristig zu planen. Als Beispiel sind hier Verkehrsleitanlagen zu nennen, die die Wegwahl oder den Verkehrsablauf beeinflussen können [Ste-2005, S. 689]. Ein kritischer Erfolgsfaktor des Verkehrsmanagements ist das kurzfristige Verhalten des Verkehrsteilnehmers und sein Vertrauen in die Entscheidung einer Leitsteuerung oder anderer Maßnahmen [Ste-2005, S. 698]. In automatisierten Transportnetzwerken kann das Vertrauen in die Entscheidungen eines Verkehrsmanagementsystems vorausgesetzt werden. Daher eignen sich die Methoden der Verkehrsplanung und -steuerung im Straßenverkehr nicht für automatisierte Transportnetzwerke.

Nicht nur für den physischen Verkehr spielt die Verkehrsplanung- und -steuerung eine wichtige Rolle, sondern auch für die Informationsübertragung in Sprach- und Daten-netzwerken. Solche Telekommunikationsnetzwerke bestehen aus lokalen Netzwerken, die miteinander verbunden sind. Die Datenübertragung innerhalb von lokalen Netzwerken erfolgt über Switches und zu anderen Netzwerken über Router. Router sind „am Rand“ eines Netzwerkes platziert und verfügen somit über die Möglichkeit, sich mit Routern anderer Netzwerke zu verbinden, während Switches „im“ Netzwerk platziert sind und nur über Verbindungen zu Switches innerhalb oder zu Routern am Rand des Netzwerkes verfügen. Router und Switches sind mit Datenleitungen untereinander verbunden [Mis-2017, S. 13ff.]. In einem Graph können Router und Switches als Knoten und Datenleitungen als Kanten betrachtet werden. Telekommunikationsnetzwerke verfügen wie Straßenverkehrsnetzwerke ebenfalls über eine begrenzte Kapazität für Daten, die während einer Zeitperiode übertragen werden können. Eine Erweiterung der Kapazität wird über die physische Schaffung von neuen Kapazitäten erreicht, beispielsweise durch das Hinzufügen neuer Datenleitungen, die Verwendung von Datenleitungen mit höherer Kapazität oder über die effizientere Nutzung vorhandener Kapazitäten [Ash-2007, S. 1ff.]. Ein zentraler Aspekt bei der effizienten Nutzung vorhandener Kapazitäten ist die Dienstgüte (Quality of Service), die Anforderungen an das Netzwerk für Übertragungsaufgaben definiert, wie beispielsweise eine garantierte Kapazität für bestimmte Dienste. Die Dienstgüte ist messbar, indem die Zufriedenheit eines Nutzers über einen Dienst ermittelt wird. Die Dienstgüte kann über verschiedene Methoden sichergestellt werden, wie z. B. durch das Priorisieren von ausgewählten Übertragungsaufgaben an einem Knoten [Ash-2007, S. 10]. Die Optimierung der

Dienstgüte ist eng verzahnt mit dem Traffic Engineering. Traffic Engineering bezeichnet die Manipulation des Verkehrs in einem Netzwerk, um den Verkehr dem Netzwerk anzupassen [Osb-2002, S. 4]. Anpassungen sind beispielsweise erforderlich, wenn der gegebene Verkehr Verbindungen überlastet. In diesem Fall kann es sinnvoll sein, einen Teil des Verkehrs der betroffenen Verbindungen über einen längeren Umweg zu leiten und somit die Auslastung der Verbindungen zu glätten. Traffic Engineering analysiert den Verkehr und trifft Entscheidungen. Die Umsetzung erfolgt beispielsweise durch die Manipulation der Steuerungsparameter von Quality of Service Methoden oder der Manipulation von Kosten für die Nutzung einer Verbindung. Die Ausgangssituation automatisierter Transportnetzwerke ist vergleichbarer zu der Ausgangssituation in Telekommunikationsnetzwerken als in Straßenverkehrsnetzwerken.

### **2.3.4 Routing in Telekommunikationsnetzwerken**

Bevor der Verkehr in Telekommunikationsnetzwerke geplant- und gesteuert wird, muss die Topologie bekannt sein. Dies erfolgt unter anderem durch das Routing. Routing bezeichnet die Bestimmung, Einrichtung und Nutzung von Routingtabellen, auf deren Basis Wege (Pfade) durch ein Netzwerk ermittelt werden. Routingtabellen enthalten die Pfade, wobei auch mehrere Pfade von einem Start- zu einem Zielknoten existieren können, und die Auswahlregeln nach denen einer Transportanfrage ein Pfad zugewiesen wird [Ash-2007, S. 10].

Es existiert eine Vielzahl von Routingverfahren für Telekommunikationsnetzwerke, die nach folgenden Kriterien unterschieden werden können [Mis-2017, S. 23f.]: Zunächst kann nach der Verfügbarkeit der Topologie unterschieden werden. Routingverfahren verfügen entweder über eine globale oder dezentrale Topologie. Bei der globalen Topologie sind dem Routingverfahren sämtliche Knoten im Netzwerk, Verbindungen zu anderen Knoten und Eigenschaften der Verbindungen (Kosten) bekannt. Routingverfahren mit einer dezentralen Topologie verfügen hingegen nur über Informationen über sich selbst, über direkt benachbarte Knoten oder Verbindungen zu benachbarten Knoten. Zusätzlich kann bei Routingverfahren noch zwischen statischer und dynamischer Information der Routingtabellen unterschieden werden. Bei statischen Informationen der Routingtabelle wird die Routingtabelle einmalig erstellt. Diese Verfahren eignen sich für kleine Netzwerke, in denen sich die Topologie selten ändert und die Eigenschaft aller Verbindungen bekannt ist. Routingverfahren mit dynamischer Information der Routingtabellen werden eingesetzt, wenn sich die Topologie häufig ändert oder Pfade häufig Neuberechnet werden sollen. Zu diesem Zweck tauschen sich die Knoten regelmäßig mit ihren Nachbarn aus, um Veränderungen zu detektieren und diese im Netzwerk bekannt zu machen. Dabei muss die Routingtabelle regelmäßig aktualisiert

werden, um die Veränderungen im Netzwerk zu berücksichtigen. Hierdurch kann verhindert werden, dass Transportanfragen über inaktive oder überlastete Knoten geleitet werden.

Um verschiedene Pfade miteinander vergleichen zu können, werden die Eigenschaften von Verbindungen mit Metriken beschrieben [Mis-2017, S. 42f.], wie in Abbildung 2-6 dargestellt. In einem Graphen repräsentieren Metriken das Kantengewicht. Welche Faktoren in die Berechnung einer Metrik mit einfließen ist abhängig vom verwendeten Routing-Algorithmus und Protokoll. Eine Metrik kann beispielsweise die Anzahl der Knoten auf einem Pfad, die Verlässlichkeit einer Verbindung, die durchschnittliche Verspätung einer Verbindung, den Verkehr, die verfügbare Bandbreite oder vom Netzwerkadministrator vergebene Kosten repräsentieren. Zusätzlich kann für den Vergleich verschiedener Pfade auch noch eine Kombination aus mehreren Metriken herangezogen werden.

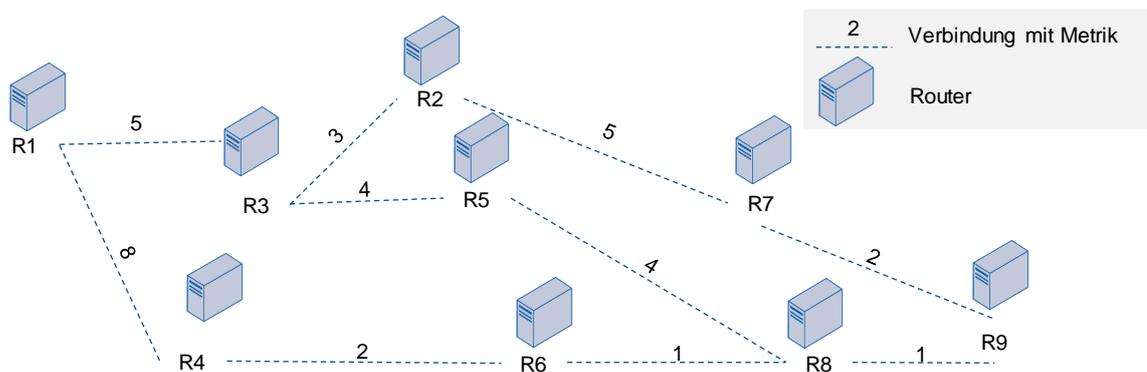


Abbildung 2-6: Schematische Abbildung eines Telekommunikationsnetzwerkes bestehend aus Routern und Verbindungen mit einer Metrik.

Dynamische Routing-Algorithmen berücksichtigen den aktuellen Verkehr im Netzwerk und die Topologie, um die Routingtabelle fortlaufend zu aktualisieren. Dynamische Routing-Algorithmen setzen sich aus zwei Komponenten zusammen. Zum einen aus dem Routing-Protokoll, welches festlegt wie Informationen zum Verkehr im Netzwerk oder der Topologie ausgetauscht werden. Dies beinhaltet welche Informationen ausgetauscht werden und zu welchen Zeitpunkten oder Ereignissen dies erfolgt. Zum anderen verfügen dynamische Routing-Verfahren über einen Algorithmus, der festlegt nach welchem Verfahren optimale Pfade berechnet werden und wie auf Veränderungen im Netzwerk reagiert wird [Mis-2017, S. 50f.].

Bei den Routing-Protokollen für dynamische Routing-Algorithmen kann nach Abbildung 2-7 zwischen Interior-Gateway-Protokollen und Exterior-Gateway-Protokollen unterschieden werden [Mis-2017, S. 50ff.]. Interior-Gateway-Protokolle werden inner-

halb eines oder mehrerer einheitlich und selbstständig verwalteter Netzwerke verwendet. Dabei kommen meist Routing-Algorithmen vom Typ Distance-Vector oder Link-State Routing zum Einsatz. Distance-Vector Verfahren verwenden z. B. den Bellmann-Ford Algorithmus und vermerken an jedem Startknoten für jeden Zielknoten einen Vektor mit der besten Metrik und dem nächsten Knoten, um den Zielknoten zu erreichen. Die Knoten tauschen periodisch die ihnen bekannten Vektoren mit den Nachbarknoten aus und aktualisieren sich somit. Veränderungen in der Topologie oder den Verbindungseigenschaften breiten sich nur langsam aus und sind daher für einfache Netzwerke geeignet.

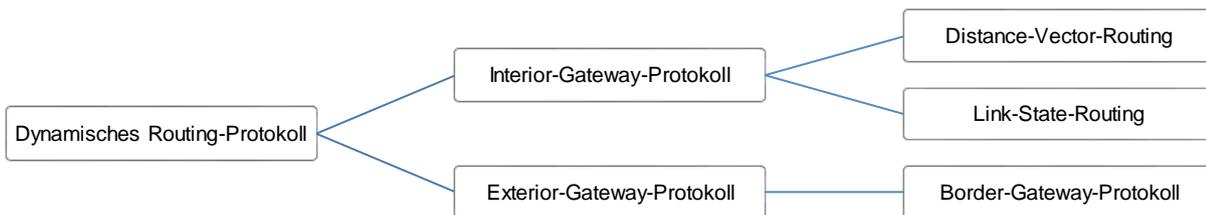


Abbildung 2-7: Klassifizierung der dynamischen Routing-Protokolle nach [Mis-2017, S. 52].

Beim Link-State Routing verfügen die Knoten über die komplette Topologie des Netzwerks oder eines definierten Bereichs. Zu diesem Zweck ermitteln die Knoten Informationen über sich selbst, ihre direkten Nachbarknoten und die Eigenschaften der Verbindung. Diese lokalen Topologie-Informationen werden zu Beginn und bei Änderungen an alle anderen Knoten im Netzwerk versendet, so dass jeder Knoten in der Lage ist aus den lokalen Topologie-Informationen eine globale Topologie zu erstellen. Die Pfade durch das Netzwerk werden beispielsweise durch SSP Algorithmen, wie z. B. den Dijkstra Algorithmus, ermittelt und in der Routingtabelle eingetragen.

Exterior-Gateway-Protokolle werden für die Verbindung zwischen eigenständig verwalteten Netzwerken eingesetzt und die Erstellung der Routingtabelle basiert nicht nur auf berechneten Metriken sondern auch auf weiteren Eigenschaften, die in die Auswahl eines Pfades mit einfließen [Mis-2017, S. 71ff.]. Beispielsweise können die weiteren Eigenschaften Strategien (Policies) zum Thema Sicherheit, Zugangskontrolle oder ökonomische Aspekte umfassen. Es existiert mittlerweile eine große Anzahl an eigenständigen Netzwerken, mit zahlreichen Verbindungen untereinander und unterschiedlichen Eigenschaften. Exterior-Gateway-Protokolle sind in der Lage auch mit einer großen Anzahl an Knoten und komplexen Vorgaben zum Routing umzugehen und setzen zu diesem Zweck auf Path-Vector Routing. Beim Path-Vector Routing erhalten die beteiligten Router den kompletten Pfad von einem Start- zu einem Zielknoten. Abhängig vom Pfad sind die Router in der Lage zu entscheiden, ob der beantragte Pfad die Vorgaben erfüllt. Beispielsweise kann ein Internetanbieter somit steuern, dass der Datenverkehr zwischen seinem und einem anderen eigenständigen Netzwerk nur über

Datenleitungen verläuft, für die er günstige Konditionen mit dem Eigentümer ausgehandelt hat. Allerdings berücksichtigt Path-Vector Routing keinen Verkehr, so dass es zu Überlastungen von Verbindungen oder einer ineffizienten Nutzung des Netzwerks kommen kann. Da nur eigenständig verwaltete Netzwerke mit Exterior-Gateway-Protokollen miteinander verbunden werden, laufen Exterior-Gateway-Protokolle auch nur auf Routern am Rand eines eigenständig verwalteten Netzwerkes und nicht auf Switches innerhalb eines eigenständig verwalteten Netzwerkes. Als Exterior-Gateway-Protokollen wird meist das Border-Gateway-Protokoll verwendet.

### 2.3.5 Verkehrsoptimierung in Telekommunikationsnetzwerken

Ein Telekommunikationsnetzwerk wird effizient genutzt, wenn es zu keinen Überlastungen an Verbindungen oder Knoten kommt. Weder der Verkehr noch die Topologie des Netzwerks können kurzfristig beeinflusst werden, daher muss der Verkehr dem Netzwerk angepasst werden. Dies geschieht durch eine Verteilung des Verkehrs auf das Netzwerk durch Traffic Engineering, so dass alle Elemente des Netzwerks möglichst gleichmäßig ausgelastet sind. Die meisten Routing-Protokolle sind darauf ausgelegt den besten Weg zu finden und brechen ab, sobald dieser gefunden wurde. Um eine bessere Verteilung des Verkehrs zu erreichen, kann das Internet Protocol Traffic Engineering eingesetzt werden [Mis-2017, S. 119]. Das Internet Protocol Traffic Engineering manipuliert die Metriken einer Verbindung, um somit die Pfadberechnung zu beeinflussen [For-2000, S. 519ff.]. Allerdings kann die Manipulation einer Metrik zur Lösung eines Problems zu einem unvorhergesehenen Verhalten in anderen Teilen des Netzwerks und neuen Problemen führen. Die Bestimmung geeigneter Metriken ist sehr komplex und teilweise sogar unmöglich [Osb-2002, S. 4ff.]. Das Asynchronous-Transfer-Mode Protokoll ermöglicht die Manipulation von Metriken für Teilabschnitte bestehend aus mehreren Knoten und Verbindungen, ohne die Metriken jeder einzelnen Verbindung manipulieren zu müssen. Zu diesem Zweck werden zwischen festgelegten Start- und Zielknoten, die nicht benachbart sein müssen, virtuelle Verbindungen mit festgelegten Metriken eingerichtet. Die Pfadberechnung kann nun sowohl die virtuellen Verbindungen als auch die physischen Verbindungen mit den entsprechenden Metriken verwenden. Ein Nachteil des Asynchronous-Transfer-Mode Protokolls ist die Flutung des Netzwerks mit Nachrichten, falls eine Verbindung ausfällt oder geändert wird [Osb-2002, S. 6f.].

Multiprotocol Label Switching (MPLS) ermöglicht unter anderem die Umsetzung von Traffic Engineering, ohne dass Metriken manipuliert werden müssen. Zentrale Argumente für die Entwicklung waren ursprünglich, dass MPLS den Durchsatz bei Routern steigern konnte. Durch das starke Wachstum der Telekommunikationsnetzwerke wurden auch die Routingtabellen immer größer, die der Routing-Algorithmus für eine Entscheidung durchsuchen musste. Durch MPLS muss nur noch eine Tabelle durchsucht

werden. Mittlerweile wurde die Architektur von Routern verbessert, so dass MPLS zu keiner Durchsatzsteigerung bei Routern mehr führt. Allerdings bietet MPLS eine gute Basis für das Traffic Engineering und wird daher nach wie vor eingesetzt [Obe-2013, S. 211f.; Osb-2002, S. 7]. MPLS zählt zu den verbindungsorientierten Protokollen und baut einen festen Pfad von einem Start- zu einem Zielrouter auf, der als Label Switched Path (LSP) bezeichnet wird, wie in Abbildung 2-8 gezeigt.

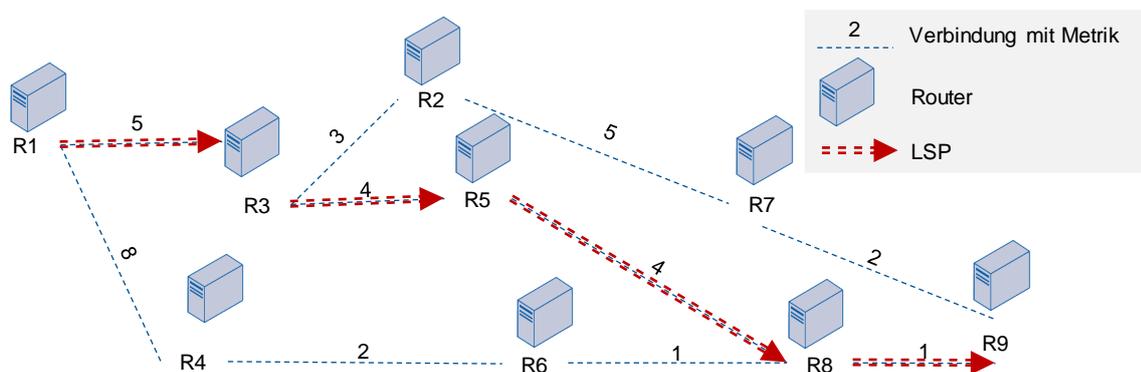


Abbildung 2-8: Eingerichteter LSP in einem schematischen Netzwerk.

Wenn ein Router Teil des LSP ist, wird dem Router unter anderem die Bezeichnung (Label) des LSP und der nächste Router mitgeteilt. Diese Informationen werden in einer Forwarding Tabelle gespeichert. Startrouter weisen Datenpaketen in Abhängigkeit vom Ziel ein LSP zu und geben dem Datenpaket das Label des ausgewählten LSP mit. An jedem Router wird das mitgeführte Label ausgelesen und anhand der Forwarding Tabelle der zugewiesene Ausgang identifiziert [Obe-2013, S. 213f.]. MPLS wird zusätzlich zu bestehenden Gateway Protokollen eingesetzt. Der Startrouter entscheidet daher, ob ein LSP verwendet werden soll oder beispielsweise der kürzeste Pfad auf Basis der Routingtabelle eines Interior-Gateway Protokolls [Obe-2013, S. 223]. Zur Überwachung des Status versenden MPLS Router periodisch Nachrichten, um beispielsweise den Ausfall eines MPLS Routers oder eine fehlerhafte Konfiguration zu erkennen. Zusätzlich bietet das MPLS Fast Reroute Verfahren eine Möglichkeit schnell auf Ausfälle reagieren zu können. Beim Fast Reroute Verfahren wird für jede Verbindung eines LSP ein Alternativ-LSP zur Umgehung dieses Links eingerichtet, der im Falle eines Ausfalls aktiviert werden kann [Obe-2013, S. 224].

Beim expliziten MPLS Routing werden die LSP bewusst angelegt und ermöglichen somit Traffic Engineering. Dabei kann zwischen einer statischen und einer automatischen Einrichtung unterschieden werden. Bei der statischen Einrichtung werden die LSP manuell oder durch offline-Optimierung ermittelt und an den betroffenen Routern eingestellt. Bei der offline-Optimierung werden Daten zum Aufbau des Netzwerkes, dem vorhandenen Verkehr sowie weitere ermittelt und anschließend optimale LSP berechnet, die dann in das Netzwerk zurückgespielt werden. Die offline-Optimierung wird

zyklisch durchgeführt und zwischen zwei Optimierungsläufen können Veränderungen in den Netzwerkeigenschaften nicht berücksichtigt werden. Eine weitere Möglichkeit, ist die automatische Einrichtung von LSP. Dies kann für den gesamten LSP erfolgen oder nur für einen Teilabschnitt. Durch die automatische Einrichtung ist es möglich, auf aktuelle Veränderungen im Netzwerk zu reagieren [Obe-2013, S. 221f.].

MPLS ist in der Lage die Nutzung des Netzwerks zu optimieren, Überlastungen zu vermeiden und auf Ausfälle von Verbindungen und Routern zu reagieren. Grundlage für die Optimierung der Netzwerknutzung ist die verfügbare Bandbreite, also die Kapazität einer Verbindung. MPLS reserviert für einen LSP Bandbreite im Netzwerk, die dann nicht mehr für andere LSP verwendet werden kann. Hierdurch wird der Verkehr im Netzwerk verteilt und Überlastungen vermieden. Nach dem Link-State Routing Prinzip teilen die MPLS Router ihre lokale Topologie und die Metrik allen anderen Routern mit. Neben der Metrik wird zusätzlich noch die verfügbare Bandbreite mitgeteilt. Jeder Router verfügt somit über die komplette Topologie des Netzwerks mit den Bandbreiten der Verbindungen [Osb-2002, S. 84f.]. Im Gegensatz zum Shortest-Path-First (SPF), das beim Link-State Routing oftmals verwendet wird, wird das Constrained-Shortest-Path-First eingesetzt (CSPF). CSPF ist in der Lage auch mehrere Kriterien bei der Routenfindung zu berücksichtigen und wird auf dem Startrouter eines LSP ausgeführt. Das CSPF ignoriert alle Einträge in der Topologie, die die vorgegebenen Bedingungen nicht erfüllen. Im Fall von MPLS werden daher alle Einträge ignoriert, die der Anforderung an die minimale Bandbreite für einen LSP nicht genügen. Mit den verbliebenen Einträgen wird wiederum nach dem SPF Verfahren ein Pfad mit minimalen Kosten gesucht [Osb-2002, S. 88ff.]. In Abbildung 2-9 ist zum einen der günstigste Pfad dargestellt, der aber nicht die Mindestanforderungen von 5 Mbps erfüllt, und der ausgewählte Pfad, der alle Anforderungen erfüllt.

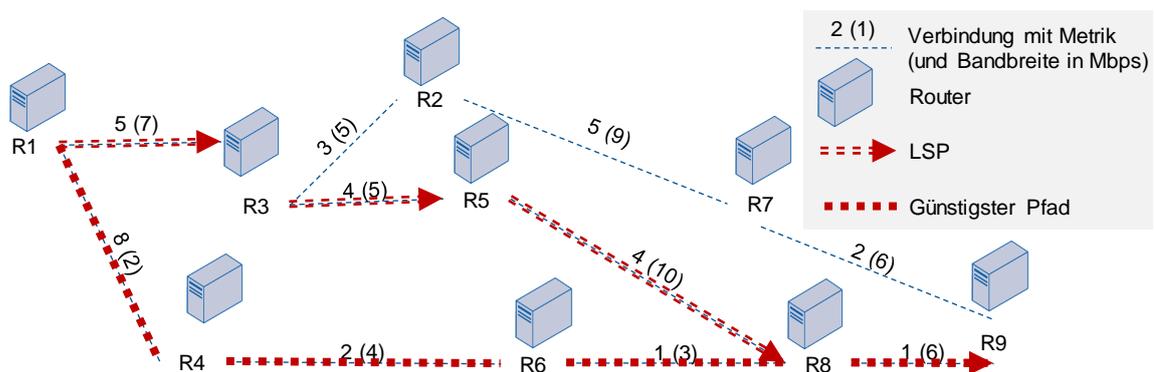


Abbildung 2-9: Berücksichtigung von weiteren Kriterien beim CSPF, wie z. B. der Bandbreite, führt zu LSP, die vom günstigsten Pfad abweichen können.

Nach der Ermittlung eines LSP teilt der Startrouter mit einer Reservierungsnachricht der Reihe nach allen Routern des LSP mit, dass sie Teil des LSP sind und die zu

reservierende Bandbreite. Die Router prüfen die Reservierungsnachricht und entscheiden, ob die beantragte Bandbreite zur Verfügung gestellt werden kann. Abhängig vom Ausgang der Prüfung aller Router des LSP erhält der Startrouter abschließend eine Rückmeldung, ob der LSP eingerichtet werden konnte oder ein Fehler aufgetreten ist. Nach einer erfolgreichen Einrichtung wird durch periodisch verschickte Wartungsnachrichten geprüft, ob der LSP noch auf allen Routern eingerichtet ist. Der Startrouter ist auch in der Lage mit einer Nachricht einen LSP zu widerrufen, falls der Startrouter der Meinung ist einen LSP nicht mehr zu benötigen. Daneben besteht noch die Möglichkeit Fehlernachrichten zu versenden, die von allen Routern des LSP verschickt werden können [Osborne-2002, S. 104ff.].

Sowohl die Eigenschaften eines Netzwerks als auch der Verkehr können sich über die Zeit ändern, so dass einmal eingerichtete LSP nicht mehr aktuell sind. Daher besteht die Möglichkeit LSP zu re-optimieren. Eine Re-Optimierung ist beispielsweise sinnvoll, wenn eine neue Verbindung eingerichtet wurde, sich die Bandbreite einer Verbindung ändert oder ein LSP weniger Bandbreite benötigt als ursprünglich geplant. Eine Re-Optimierung kann periodisch erfolgen, indem jedem LSP eine Zeit zugewiesen wird zu der versucht werden soll einen besseren Pfad zu finden. Die Zeit bis zur nächsten Optimierung wird global festgelegt, beginnt aber erst nach der Einrichtung beziehungsweise der letzten Re-Optimierung eines LSP abzulaufen. Eine weitere Möglichkeit ist die ereignisbasierte Re-Optimierung, beispielsweise wenn eine neue Verbindung eingerichtet wird. Zusätzlich besteht noch die Möglichkeit die Re-Optimierung manuell anzustoßen oder eine Re-Optimierung für einen LSP explizit auszuschließen [Osborne-2002, S. 100ff.].

## 2.4 Analytische Methoden der Materialflussberechnung

Der nachfolgende Abschnitt behandelt die Möglichkeit mehrere Transporte in einem System zu planen und zu koordinieren.

### 2.4.1 Durchsatzberechnung

Die Durchsatzberechnung für Stückguttransporte, wie sie in MFS auftreten, werden im Folgenden nach *Gudehus* erläutert [Gudehus-2011, S. 462ff.]. Die mittlere Taktzeit  $\tau$  gibt die durchschnittliche Dauer zwischen zwei TE an, wie in Abbildung 2-10 gezeigt. Der mittlere Durchsatz  $\lambda$  berechnet sich nach (2-2).

$$\lambda = \frac{1}{\tau} \quad (2-2)$$

In Abbildung 2-10 ist eine stetige Verbindung (Transportelement) gezeigt, das TE vom Eingang bis zum Ausgang kontinuierlich ohne Unterbrechung fördert. Die Taktrate berechnet sich aus dem Abstand zwischen zwei TE und der Geschwindigkeit. Für unstetige Verbindungen wie beispielsweise einem Drehtisch oder Querverschiebewagen (QVW) setzt sich die Taktzeit aus den Zeitkomponenten Aufnahme der TE, Transport der TE, Abgabe der TE und Positionierung an der Startposition zusammen.

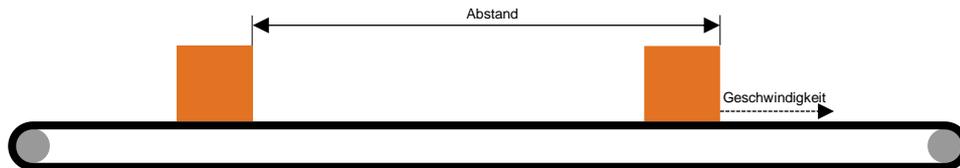


Abbildung 2-10: Diskreter Transport mit mittlerem Abstand und Geschwindigkeit auf einem stetigen Förderelement vom Typ Bandförderer.

Der mittlere Durchsatz ist stationär, solange keine Zeitabhängigkeit beispielsweise durch saisonale Schwankungen oder veränderte Transportströme besteht. Der Grenzdurchsatz  $\lambda_{Grenz}$  gibt den maximalen technischen Durchsatz eines Transportelements beziehungsweise einer Förderstrecke an und berechnet sich analog mit (2-2) und der minimalen Taktzeit, die eine Förderstrecke zulässt. Die Auslastung  $\rho$  ergibt sich nach (2-3) aus dem mittleren Durchsatz und dem Grenzdurchsatz.

$$\rho = \frac{\lambda}{\lambda_{Grenz}} \quad (2-3)$$

Neben Transportelementen mit einem Ein- und Ausgang existieren noch Zusammenführungen mit mehreren Eingängen und einem Ausgang, Verzweigungen mit einem Eingang und mehreren Ausgängen und Transportelemente höherer Ordnung mit mehreren Ein- und Ausgängen, wie ein Querverschiebewagen (QVW) in Abbildung 2-11.

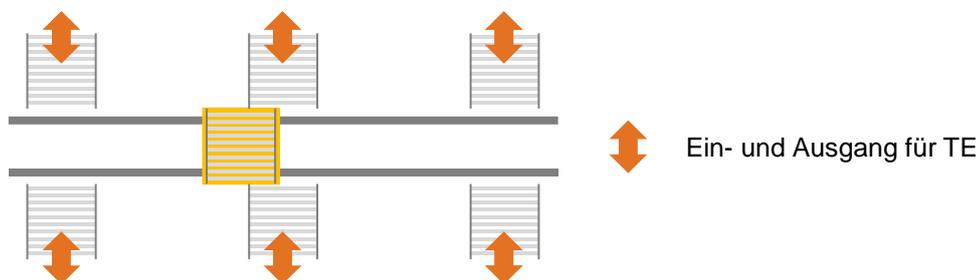


Abbildung 2-11: QVW als Transportelement höherer Ordnung mit mehreren Ein- und Ausgängen.

Der Durchsatz eines Transportelements höherer Ordnung setzt sich aus den partialen Transportströmen (Partialströme) von den einzelnen Ein-  $\lambda_E$  zu den Ausgängen  $\lambda_A$  zusammen und wird nach (2-4) berechnet.

$$\lambda = \sum_i \lambda_{E,i} = \sum_j \lambda_{A,j} \quad (2-4)$$

Transportelemente mit mehreren Ein- und Ausgängen müssen zwischen den verschiedenen Partialströmen hin- und herschalten. Nachdem der QVW beispielsweise mehrere TE von Eingang 1 zu Ausgang 2 mit  $\tau_{E1,A,2}$  transportiert hat, erfolgen anschließend mehrere Transporte von Eingang 3 zu Ausgang 1 mit  $\tau_{E3,A,1}$ . Für den Wechsel zwischen den beiden Partialströmen fällt eine Wechselzeit an, um von Ausgang 2 dem Endpunkt des abgeschlossenen Partialstroms zu Eingang 3 dem Startpunkt des nachfolgenden Partialstroms zu wechseln. Während der Wechselzeit steht ein Transportelement nicht für Transporte zur Verfügung und beeinflusst somit den Durchsatz eines Transportelements.

### 2.4.2 Zufallsprozesse und Verteilungen

Materialflussströme in Materialflusssystemen sind stochastischen Einflüssen unterworfen, die sich durch Häufigkeitsverteilungen beschreiben lassen [Gud-2011, S. 239ff.]. Quellen liefern beispielsweise nicht in regelmäßigen Takten neue TE, sondern schwanken. Beispielsweise entstehen Schwankungen bei der manuellen Entladung eines Lastkraftwagens, wenn der Mitarbeiter in unregelmäßigen Abständen TE entlädt, oder im Lager, wenn unterschiedliche Wegstrecken zurückgelegt werden müssen. Selbst wenn die Quellprozesse regelmäßig liefern, entstehen spätestens durch Kreuzungen oder das Zusammenwirken zwischen unterschiedlichen Materialflussströmen stochastische Einflüsse.

Logistische Prozesse lassen sich durch die Exponentialverteilung annähern, wenn die Taktzeiten  $\tau$  jeden positiven Wert annehmen können. In der Logistik herrschen vornehmlich diskrete Materialflussströme vor, die sich durch eine mittlere Taktzeit  $\tau_P$  zwischen Ereignissen eines Prozesses beschreiben lassen. Dabei sinkt die Wahrscheinlichkeit für die Ankunft einer TE mit zunehmender Taktzeit. Für die Aufstellung einer Exponentialverteilung wird nur der Mittelwert benötigt mit der Wahrscheinlichkeitsfunktion  $w_E(\tau)$  (2-5). Die Exponentialverteilung eignet sich bei Vorliegen eines technischen Minimalwertes. Allerdings sollte die Exponentialverteilung auch dann eingesetzt werden, wenn nur der Mittelwert  $\tau_P$  bekannt ist und keine Informationen über die Streuung vorliegen.

$$w_E(\tau) = \frac{1}{\tau_P} e^{-\frac{\tau}{\tau_P}} \quad (2-5)$$

Für die Anwendung in Materialflusssystemen lässt sich auch noch eine minimale Taktzeit  $\tau_0 > 0$  definieren, so dass sich die Funktion für die modifizierte Exponentialverteilung nach (2-6) ergibt. Hierbei gilt zusätzlich  $\tau_0 \neq \tau_P$ .

$$w_E(\tau) = \begin{cases} 0 & , \tau < \tau_0 \\ \frac{1}{\tau_P - \tau_0} e^{\frac{-\tau - \tau_0}{\tau_P - \tau_0}} & , \tau \geq \tau_0 \end{cases} \quad (2-6)$$

Die Normalverteilung (Gauß-Verteilung) eignet sich für logistische Prozesse, wenn neben dem Mittelwert auch die Streuung  $s$  der Werte um den Mittelwert bekannt ist. Die Wahrscheinlichkeitsfunktion  $w_N(\tau)$  der Normalverteilung für die Taktzeit ist in (2-7) gezeigt.

$$w_N(\tau) = \frac{1}{\sqrt{2\pi s^2}} e^{-\frac{(\frac{\tau}{s} - \frac{\tau_P}{s})^2}{2}} \quad (2-7)$$

Die Normalverteilung ist besonders dann geeignet, wenn sich die Häufigkeitsverteilung aus vielen unabhängigen Zufallsgrößen ergibt.

### 2.4.3 Berechnung von Warteschlangen

Warteschlangen entstehen vor Engpassstellen in Materialflusssystemen, wenn die Belastung an einer Stelle die Grenzbelastung überschreitet. Stochastische Warteschlangen entstehen bei einer temporären Überschreitung und unendliche Warteschlangen bei einer dauerhaften Überschreitung der Grenzbelastung. Die Eigenschaften von stochastischen Warteschlangen wie z. B. die maximale Länge lassen sich mit Hilfe der Warteschlangentheorie bestimmen [Fer-1964, S. 125ff.].

Für die Logistik lässt sich die Warteschlangentheorie an einem Bediensystem (Wartesystem) veranschaulichen [Arn-2009, S. 111ff.], wie in Abbildung 2-12 skizziert. Das Bediensystem wird durch eine Quelle mit TE gespeist. Die TE treffen im Ankunftsprozess mit einer schwankenden Zwischenankunftszeit  $t_a$  ein. Für den Ankunftsprozess kann der Erwartungswert  $E(t_a)$  bestimmt werden, der die mittlere Zwischenankunftszeit repräsentiert. Der Bedienprozess lässt sich ebenfalls mit einer schwankenden Bedienzeit  $t_b$  und dem Erwartungswert  $E(t_b)$  beschreiben.

Falls bei einem regelmäßigen getakteten Bediensystem die Bedienzeit kleiner ist als die Zwischenankunftszeit bildet sich keine Warteschlange. Sobald einer von beiden Prozessen stochastischen Einflüssen unterliegt, bildet sich eine Warteschlange. Je

kleiner der Abstand zwischen den Erwartungswerten der Bedienzeit und der Zwischenankunftszeit ist, desto stärker ist der Bedienprozess ausgelastet und desto länger ist die Warteschlange. Die Länge der Warteschlange wird mit  $N_W$  beschrieben und bezeichnet die mittlere Anzahl der TE in der Warteschlange im Warteprozess. In einem Bediensystem können auch mehrere gleiche Bedienstationen vorhanden sein.

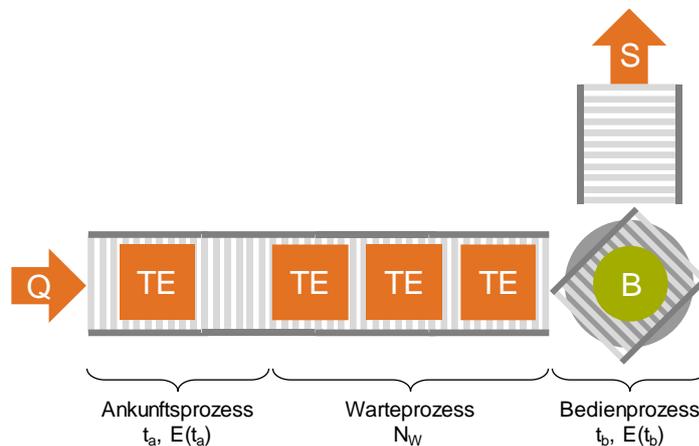


Abbildung 2-12: Bediensystem mit einer Quelle (Q), einer Senke (S) und einem Drehtisch als Bedienstation (B) in Anlehnung an [Arn-2009, S. 113].

Der Warteprozess hängt von der Verteilung der Zwischenankunfts- und Bedienzeit ab. Abhängig von der Kombination der Verteilungen ergeben sich verschiedene Wartesystem Modelle mit unterschiedlichen Berechnungswegen und Formeln für den Warteprozess. Die Wartesystem Modelle werden mit der Kendall Notation nach Folgendem Muster beschrieben:  $A|B|m|xxxx$

- A: Repräsentiert die Verteilung der Zwischenankunftszeiten
- B: Repräsentiert die Verteilung der Bedienzeiten
- m: Repräsentiert die Anzahl gleicher Bedienstationen
- xxxx: Repräsentiert die Strategie nach der TE aus dem Warteraum entnommen werden

Für die Verteilung der Zwischenankunfts- und Bedienzeiten werden meist eine Exponentialverteilung (M), k-Erlangverteilung ( $E_k$ ), Diracverteilung (D) oder Allgemeine Verteilung (G) angenommen. Als Bedienstrategie wird in der Regel First In First Out (FIFO) herangezogen.

#### 2.4.4 Blockierungen

Befinden sich mehrere TE in einem System kann es zu gegenseitigen Blockierungen (Deadlocks) kommen. Eine Blockierung tritt auf, wenn ein Prozess exklusiv auf eine Ressource zugreifen möchte, die bereits durch einen anderen Prozess belegt ist. Der

bereits laufende Prozess kann nicht verlegt werden und wartet selbst auf eine andere Ressource, die ebenfalls belegt ist. Besteht nun eine gegenseitige Abhängigkeit zwischen den verschiedenen Prozessen, kann es zu einem Kreisschluss kommen, durch den die Prozesse gegenseitig aufeinander warten und somit nicht abgeschlossen werden können [Cof-1971, S. 70]. Im Falle von TE bedeutet dies z. B., dass zwei TE, die auf einer Strecke gleichzeitig und in entgegengesetzter Richtung gefördert werden sollen, sich gegenseitig bei der Transportausführung blockieren.

Grundsätzlich lassen sich Verfahren zur Handhabung von Deadlocks in drei verschiedene Kategorien einteilen [Cof-1971, S. 72ff.]:

- Vermeidung: Das System besitzt Informationen über die zukünftige Nutzung der Ressourcen und verhindert das Auftreten von Deadlocks durch eine Vorausplanung. Für TE verhindert das System z. B., dass zwei gegenläufige TE zur selben Zeit dieselbe Strecke befahren.
- Prävention: Deadlocks sind durch das Systemdesign von vorneherein ausgeschlossen. Im Falle von TE sind z. B. bidirektionale Strecken immer so gestaltet, dass gegenläufige TE aneinander vorbeigeführt werden können.
- Erkennung und Auflösung: Das System erkennt das Auftreten von Deadlocks und löst diese auf. Blockieren sich zwei TE auf einer Strecke wird z. B. eine TE zurückgefahren und lässt zuerst die andere TE die Strecke passieren.

#### 2.4.5 Reservierung mit Zeitfenstern

Eine Möglichkeit Transporte voranzuplanen und somit Deadlocks zu vermeiden ist das zeitenfensterbasierte Routing. Hierfür reserviert ein Planungsalgorithmus entlang einer Route Ressourcen exklusiv für eine TE. Die Reservierung gilt für einen definierten Zeitraum (Zeitfenster), währenddessen nur die definierte TE die Ressource nutzen darf, wie in Abbildung 2-13 an einem schematischen Beispiel mit 4 Ressourcen (Modulen) gezeigt [Kim-1991; Mor-2010].

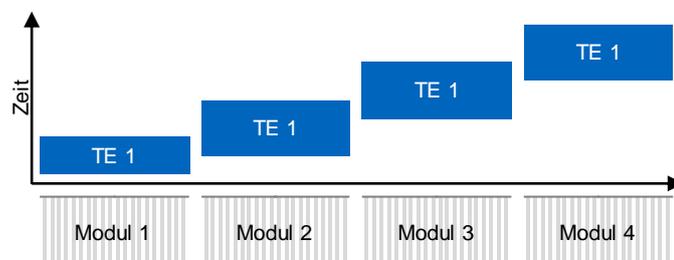


Abbildung 2-13: Reservierung von Modulen für eine TE zu vordefinierten Zeitfenstern.

Falls keine Überlappungen zwischen den Zeitfenstern zweier TE auf demselben Modul bestehen und sich jede TE an das vordefinierte Zeitfenster hält, sind Deadlocks ausgeschlossen. Das Konzept ist auch robust gegen Verspätungen. Verspätet sich eine TE auf einem Modul, dürfen andere bereitstehende TE z. B. an einer Kreuzung mit späteren Zeitfenstern nicht vorher abgearbeitet werden, sondern müssen auf die verspätete TE warten. Hierdurch überträgt sich zwar die Verspätung auch auf die anderen TE, aber die durch die Zeitfenster gebildete Reihenfolge der TE auf einem Modul wird eingehalten. Durch die Einhaltung der Reihenfolge ist ebenfalls garantiert, dass Deadlocks auch bei Verspätungen nicht auftreten können [Maz-2001, S. 762f.].

## 3 Stand der Wissenschaft und Forschungsfrage

---

Diverse Forschungs- und Entwicklungsprojekte beschäftigten sich bereits mit einzelnen Fragestellungen oder der kompletten Gestaltung von aMFS. Auch im Bereich der adaptiven Produktion und in anderen Bereichen finden sich erste Ansätze, die für aMFS adaptiert werden können. Dieser Abschnitt fasst daher den Stand der Wissenschaft zu aMFS zusammen, identifiziert den weiteren Handlungsbedarf und führt zur Forschungsfrage dieser Arbeit.

### 3.1 Stand der Wissenschaft zu adaptiven Systemen

#### 3.1.1 Flexible und adaptive Materialflusssysteme

Der Vergleich, der bereits bestehenden aMFS, erfolgt anhand der zwei Kategorien Modulheterogenität und Selbstkonfigurationsgrad, die zusammen die zentralen Eigenschaften eines aMFS abdecken. Die Klassifizierung nach der Modulheterogenität beschreibt die Möglichkeit verschiedene Typen an Komponenten in ein System integrieren zu können. Ein wesentlicher Aspekt ist hierbei, neue Komponenten im Laufe der Zeit zu integrieren. Die Klassifizierung nach dem Selbstkonfigurationsgrad beschreibt den manuellen Aufwand, der bei der Inbetriebnahme für neue oder geänderte Anlagen anfällt. Der Aufwand für die Installation und Aufbau der Anlage liegt hier nicht im Fokus, sondern der manuelle Aufwand von der Aktivierung des aMFS bis zum ersten Transport.

Die Forschungsprojekte *CogniLog* [Krü-2015] und *FlexFörderer* [May-2009; Sei-2016] basieren auf vergleichbaren Konzepten. In beiden Projekten kommen speziell entwickelte Module im aMFS zum Einsatz. Die Heterogenität der verwendeten Module ist daher eingeschränkt. Beim Projekt *FlexFörderer* kommen immer gleichartige Rollenförderer zum Einsatz mit einer geringen Varianz. Beispielsweise wird die Länge variiert und zusätzliche Funktionalitäten wie ein Barcodelesegerät integriert. Ein Vorgehen zur Entwicklung neuer Module und zur Parametrisierung war nicht Fokus dieser Projekte. Die Materialflusssteuerung ist auf die Ansteuerung von standardisierten Modulen zum Transport einer einzelnen TE zur gleichen Zeit ausgelegt. Der Selbstkonfigurationsgrad ist hier als sehr hoch zu bewerten, da keinerlei manuelle Programmierung oder Parametrierung mehr benötigt wird. Das Projekt *CogniLog* ist der zellularen Förderer-technik zuzuordnen. Hier wird aus gleichartigen Rollen wiederum ein Layout zusammengebaut. Im Unterschied zum *FlexFörderer* können für den Transport einer TE

mehrere Module zusammenarbeiten, um beispielsweise ein großes Paket zu transportieren. Hier ist die Modulheterogenität allerdings noch stärker eingeschränkt, da es nur einen Modultypen gibt. Die Projekte CogniLog und FlexFörderer koordinieren Transporte über die Reservierung von Modulen und vermeiden somit Blockaden. Eine Optimierung der einzelnen Module z. B. nach Durchsatz oder Auslastung findet nicht statt. Auch eine Strategie wird nicht angewendet.

Die Projekte *IML Agenten* [Lib-2011] und *Internet of Things* [Gün-2010b] definieren Module aus den vielfältigen Komponenten bestehender MFS und legen den Fokus auf die Entwicklung der Steuerung. Für die Bildung von Modulen wird die funktionsorientierte Modularisierung angewendet. Dabei werden Modulgrenzen in Abhängigkeit der Funktionalität von Fördertechnikkomponenten gezogen. Für die Gestaltung solcher Module wurden bereits Gestaltungsregeln erarbeitet [Wil-2006, S. 29ff.]. Für die Steuerung von aMFS, die sich einfach und ohne lange Inbetriebnahmezeiten erweitern lassen, wurden in der Vergangenheit vornehmlich MAS verwendet, in denen einzelne Agenten jeweils ein autonomes Modul in der Steuerung repräsentierten. In den Projekten *IML Agenten* und *Internet of Things* wurden auf dieser Basis Materialflusssteuerungen entwickelt, die auch heterogene Module umfassen. Allerdings ist im Vorfeld ein hoher Aufwand an manueller Parametrierung und teilweise Programmierung notwendig, bevor die Systeme in Betrieb gehen konnten. In einem Teilprojekt aus dem Bereich *Internet of Things* erfolgt beispielsweise vor der Inbetriebnahme über eine grafische Benutzeroberfläche eine Parametrierung der Schnittstellen zwischen den Modulen. Im Projekt *IML Agenten* wurde ein Vorgehen und Methoden entwickelt, die die Modellierung und den Aufbau der Agentenarchitektur eines aMFS unterstützen. Auf Basis des standardisierten Vorgehens wird für jedes Materialflusssystem eine spezifische Agentensteuerung manuell entwickelt, die auf die verwendeten Module und den Anwendungsfall angepasst wird. Die Projekte *IML Agenten* und *Internet of Things* koordinieren teilweise Transporte, verlassen sich aber im Wesentlichen darauf, dass Blockaden über die Gestaltung des Layouts ausgeschlossen werden. Im Gegenzug führen die Konzepte eine Optimierung des Materialflusses durch, z. B. durch eine Zuweisung von Kosten an Module in Abhängigkeit des Verkehrsaufkommens.

Auch im Bereich von Gepäckförderanlagen gibt es Bestrebungen die Steuerung flexibler zu gestalten. *Black et al.* verwenden ein MAS, das mit Funktionsblöcken nach dem IEC 61499 Standard arbeitet. Die Gepäckförderanlagen bestehen aus einzelnen Modulen, für die jeweils ein Funktionsblock vordefiniert ist. Der Entwickler stellt die Funktionsblöcke für eine Anlage zusammen und die Funktionsblöcke sind anschließend in der Lage miteinander zu kommunizieren und das System zu steuern [Bla-2010]. *Priego et al.* setzen ebenfalls auf ein MAS, das allerdings während der Laufzeit

auf Änderungen reagiert und die Steuerungssoftware auf einer anderen Steuerungshardware ausführen kann [Pri-2015]. *Spindler* entwickelt eine Steuerungsarchitektur, die es ermöglicht modellbasiert Steuerungen für MAS zu erstellen. In einer Bibliothek sind für jedes Modul standardisierte Bausteine hinterlegt. Der Entwickler fügt die Module aus der Bibliothek für eine spezifische Anlage zu einem Anlagenmodell zusammen. Anschließend erfolgt die automatische Generierung der anlagenindividuellen Steuerungssoftware [Spi-2018]. *Haneyah* verwendet einen generischen Ansatz und definierte eine allgemeine Materialflusssteuerung für verschiedene Einsatzgebiete wie Gepäckförderanlagen, Kommissionier- und Sortiersysteme. Der Entwickler parametrisiert die generische Steuerung mit dem zu steuernden MAS ohne zusätzlichen Programmieraufwand, solange sich das System an vordefinierte Standards hält [Han-2013]. Den eben beschriebenen Ansätzen ist gemein, dass sie mit einer zentralen Steuerung arbeiten und einen manuellen Konfigurationsaufwand erfordern. Allerdings sind alle Ansätze in der Lage, verschiedene Typen an Modulen in das MAS zu integrieren.

Für die Flexibilisierung der Planung von MFS existieren ebenfalls Ansätze, die auf eine Modularisierung und MAS für die Planungsaufgabe setzen [Bey-2019; You-2018; Mar-2018]. Allerdings stehen hier die Inbetriebnahme und der operative Betrieb nicht im Fokus.

### 3.1.2 Flexible und adaptiven Produktionssysteme

Im Bereich der Produktion beschäftigten sich diverse Forschungsprojekte mit der Flexibilisierung von Maschinen und Anlagen. Zunächst sind hier holonische Produktionssysteme zu nennen, die bereits Anfang der 90er aufkamen. Ein Holon, der Aufgaben wie z. B. die Transformation, den Transport, die Lagerung oder die Informationsverarbeitung mit oder ohne physische Objekte durchführen kann, ist definiert als autonomer und kooperierender Block in einem Produktionssystem. Er kann also Informationen verarbeiten und physische Prozesse ausführen. Mehrere Holone bilden ein holonisches Produktionssystem und führen durch Kooperation gemeinsam eine Aufgabe aus wie die Fertigung eines Produktes. Holonische Produktionssysteme lassen sich durch den Austausch von Holonen umbauen und auf veränderte Anforderungen anpassen [Val-1994, S. 129]. *Brussel et al.* entwickelten eine Referenzarchitektur für holonische Produktionssysteme, in der sie verschiedene Typen an Holons definierten. Ressourcen Holone bilden eine Produktionsressource wie z. B. eine Werkzeugmaschine, Förderband oder Rohmaterialien sowohl physisch als auch die zugehörige Steuerungssoftware und bieten ihre Fähigkeit anderen Holone an. Das physische Produktionssystem und die Produktionssteuerung werden nicht mehr getrennt betrachtet, sondern in einem Holon vereinigt. Produkt-Holone erfassen Informationen und kontrollieren die

Einhaltung des Prozesses. Sie repräsentieren aber nicht ein einzelnes Produkt, sondern sammeln allgemein Informationen über einen Produkttyp. Auftrags-Holone steuern den Ablauf eines Produktes durch das Produktionssystem und sind für die Einhaltung der Liefertermine verantwortlich [Bru-1998, S. 257f.]. Die Steuerung von holonischen Produktionssystemen erfolgt meist durch ein MAS und beinhaltet neben der Auswahl von geeigneten Holonen auch eine strategische Komponente zur gleichmäßigen Auslastung von Ressourcen-Holonen [Mat-1999, S. 2161ff.; Mon-2006, S. 704ff.; She-2000, S. 244ff.; Mař-2003, S. 533ff.; Fle-2003, S. 533ff.; Gor-2003, S. 236ff.]. Die strategische Steuerung und Koordination von Materialflüssen wurde hier nicht oder nur aus Kapazitätssicht betrachtet.

Die Granularität der Betrachtung von Komponenten ist bei Evolvable Production Systems feiner als bei holonischen Produktionssystemen. Evolvable Production Systems sollen sich veränderten Produkt- und Prozessanforderungen anpassen, indem möglichst kleinskalige standardisierte Module definiert werden, wie einzelne Aktoren. Kleinskalige Module bieten mehr Flexibilität für die Gestaltung neuer Prozesse und damit neuer Produkte, da mehr Kombinationsmöglichkeiten zwischen den Modulen bestehen. Hierdurch wird eine kontinuierliche Anpassung des Produktionssystems ermöglicht. Statt also einzelne Module flexibel zu gestalten, werden die Module feiner unterteilt und standardisierte Funktionalitäten definiert. Die Herausforderung liegt dann darin, diese standardisierten Funktionalitäten miteinander zu kombinieren und zu steuern. Zu diesem Zweck wurde ein allgemeines Steuerungskonzept und eine Referenzarchitektur entwickelt, die für verschiedene Anwendungsgebiete und Domänen angepasst werden müssen [Ono-2006, S. 317ff.; Lin-2007, S. 1ff.]. Logistische Prozesse werden hier nicht explizit betrachtet. Der Materialfluss ergibt sich automatisch aus der Verkettung und der Verfügbarkeit der einzelnen Module. Der sich hieraus ergebende ineffiziente Materialfluss soll durch niedrigere Umlaufbestände und verkürzte Durchlaufzeiten ausgeglichen werden [Aki-2011, S. 6]. Somit bieten Evolvable Production Systems keine Lösung zur strategischen Steuerung und Koordination von Materialflüssen an.

Zusammenfassend ist ein wesentliches Unterscheidungsmerkmal der Ansätze die Granularität der Implementierung [Ono-2009, S. 80f.]. Ansonsten weisen die Ansätze die Gemeinsamkeit auf, dass sie abgekapselte Module definieren, die durch eigene Steuerungssoftware autonom im System agieren. Die Fähigkeit autonom zu handeln umfasst dabei die Eigenschaft, dass ein Modul sowohl über die technische Ausstattung, wie z. B. Aktoren und Sensoren, als auch über die Software verfügt, um Funktionen eigenständig auszuführen. Dies ermöglicht den Plug-and-Play Einsatz eines Moduls in beliebigen Systemen und Konfigurationen, unabhängig vom Aufbau des Sys-

tems und den eingesetzten Modulen. Führen mehrere Module eine gemeinsame Funktion aus, hängt die Ausführung der Funktion von der Systemkonfiguration ab. Durch die eigene Steuerungshardware und -software sind die Module in der Lage, sich ohne manuelle Unterstützung in ein bestehendes System einzufügen [Ono-2006, S. 319f.].

Die Planung und Steuerung von modularisierten Produktionssystemen wurde in verschiedenen Forschungsprojekten untersucht wie z. B. *EUPASS*, *IDEAS*, *Transparency* oder *ReBorn* [Dan-2017, S. 850]. Im Zuge dieser Projekte wurden unter anderem Formate entwickelt, die Ressourcen, Produkte und Prozesse formal beschreiben. Auf Basis der formalen Beschreibung der Eigenschaften kann ein automatisierter Abgleich erfolgen und die Produktion geplant und gesteuert werden.

### 3.2 Handlungsbedarf für aMFS

In Abbildung 3-1 erfolgt eine qualitative Klassifizierung der oben beschriebenen Projekte und Forschungsbereiche nach dem Selbstkonfigurationsgrad und der Modulheterogenität. Systeme oder Steuerungen für aMFS, die gleichzeitig einen hohen Selbstkonfigurationsgrad und Modulheterogenität aufweisen, existieren im Gegensatz zum Bereich der adaptiven Produktionssysteme derzeit nicht.

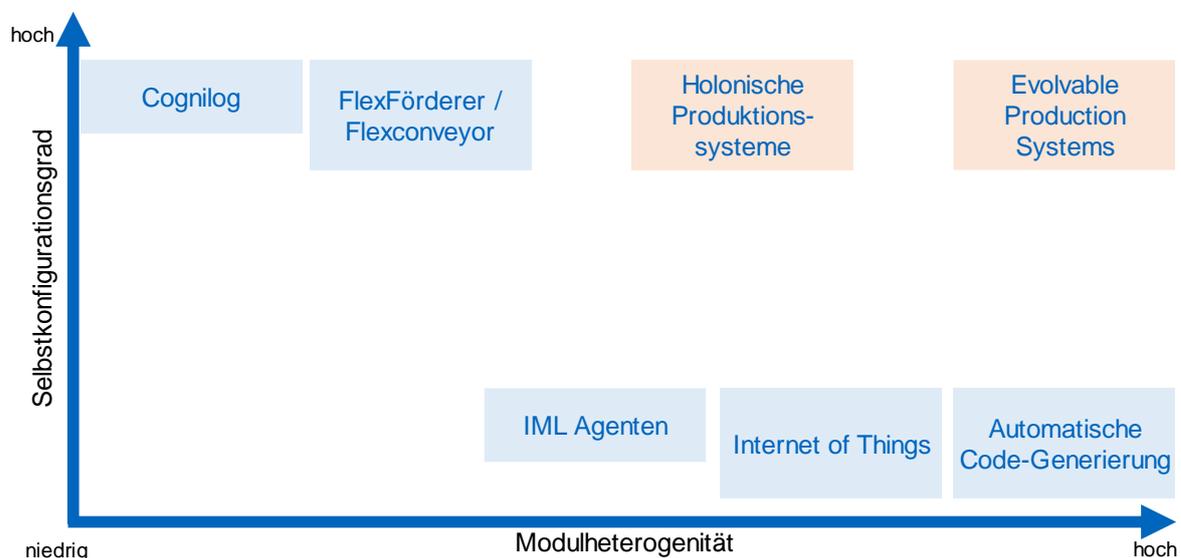


Abbildung 3-1: Klassifizierung des Stands der Wissenschaft mit blau für Logistikprojekte und orange für Produktionsprojekte.

Der Bereich der adaptiven Produktionssysteme ist somit schon weiter fortgeschritten, allerdings wird das Thema Materialflusssteuerung hier nur rudimentär behandelt. Beispielsweise verlassen sich die Konzepte darauf, dass Blockaden über die Gestaltung

des Layouts ausgeschlossen sind und eine Verkehrscoordination mit rudimentären Kostenmodellen abgedeckt ist. Um den Materialfluss zwischen den Modulen und Komponenten der adaptiven Produktionssysteme effizient steuern zu können, bedarf es einer Weiterentwicklung der aMFS. Adaptive Produktionssysteme legen den Schwerpunkt zum einen auf die Beschreibung der Fähigkeiten von Modulen und Komponenten, die die Steuerung mit den Anforderungen des Produktes abgleicht. Zum anderen liegt ein Schwerpunkt in der Zusammenarbeit zwischen den verschiedenen Modulen und Komponenten, um gemeinsam die Anforderungen eines Produktes zu erfüllen. Sowohl die Beschreibung der Fähigkeiten als auch die Koordination der Zusammenarbeit zwischen verschiedenen Modulen ist ein Thema für aMFS. Allerdings sind Vereinfachungen denkbar, da es deutlich weniger Operationen gibt, die ein aMFS an einer TE ausführt. Als Fazit kann festgehalten werden, dass für die Steuerungsarchitektur, die Modulbeschreibung und die Schnittstellenkonfiguration Adaptionen für aMFS möglich sind.

Die bisherigen Steuerungsansätze für aMFS konzentrierten sich entweder auf die grundsätzliche technische Machbarkeit (*IML Agenten, Internet of Things*), die robuste Steuerung von kleinen aMFS durch Vermeidung von Blockaden (*Cognilog, FlexFörderer*), die Evaluation von einzelnen Steuerungsstrategien (*Internet of Things*) oder die Vereinfachung des Entwicklungsprozesses von konventionellen Steuerungen durch Teilautomatisierung (*Black, Spindler, Haneyah*). Insgesamt lassen sich zwei Philosophien identifizieren. Zum einen die Modularisierung von Systemen und zum anderen die Automatisierung des konventionellen Entwicklungsprozesses. Einsatzfelder für eine anlagenindividuelle Steuerung sind auch in Zukunft MFS mit hohen Leistungsanforderungen und konstanten Anforderungen über die Zeit, wie beispielsweise Sortierzentren mit konstanten Sortierkriterien (Pakete nach Städten sortieren). Teil- oder vollautomatisierte Entwicklungsprozesse unterstützen hier die Entwicklung einer effizienten, anlagenindividuellen Steuerung. Die flexible Reaktion auf Änderungen des Layouts oder der Materialflussanforderungen während des Betriebes ermöglichen hingegen modularisierte Systeme, die im weiteren Verlauf der Arbeit im Fokus stehen [Lie-2017, S. 484ff.].

Den Nachweis für die grundsätzliche technische Machbarkeit und die robuste Steuerung von aMFS erbringen die oben genannten Vorarbeiten. Durch den vermehrten Einsatz von aMFS insbesondere in großen Systemen ergeben sich nun neue Herausforderungen. In großen aMFS bestehen zahlreiche Abhängigkeiten zwischen den Transporten. In den bisherigen Ansätzen fand eine Koordination der Transporte und die Optimierung einzelner Module z. B. hinsichtlich Kosten statt. Allerdings ist die Betrachtung einzelner Module in großen aMFS unzureichend, da durch die gegenseitigen

Abhängigkeiten der Transporte lokale Optimierungen zu ungünstigen Zuständen in anderen Teilen des aMFS führen können. Die bisherigen Ansätze berücksichtigen bei der Planung und Steuerung nicht das Gesamtsystem und sind daher nicht in der Lage den Materialfluss global zu optimieren. Durch den Einsatz von heterogenen Modulen ergeben sich zusätzliche Anforderungen an die Steuerung, wie z.B. Vorbereitungszeiten, die bisher noch nicht berücksichtigt wurden.

### 3.3 Forschungsfrage

Für den zunehmenden Einsatz von aMFS bedarf es einer Steuerung, die einen hohen Grad an Selbstkonfiguration aufweist, um Veränderungen des Layouts möglichst einfach umzusetzen, und die mit einer großen Modulheterogenität zurechtkommt, um einen möglichst breiten Anwendungsbereich abzudecken. Ein zentraler Aspekt ist hierbei den Materialfluss effizient zu steuern. Die reine Koordination von Transporten und lokale Optimierung von einzelnen Modulen oder Bereichen stößt insbesondere in größeren aMFS an ihre Grenzen. Potentiale in der Optimierung von aMFS liegen in der globalen Betrachtung von Transporten und deren Planung. Gleichzeitig muss die Steuerung adaptiv gestaltet sein und selbstständig auf Änderungen im Layout und den Materialflussanforderungen reagieren.

Ein wesentlicher Aspekt für die Gestaltung einer adaptiven Materialflusssteuerung ist die Architektur. aMFS sind ständig Änderungen unterworfen. Somit ist eine Steuerungsarchitektur erforderlich, die ebenfalls in der Lage ist sich Änderungen anzupassen und eine gute Skalierbarkeit aufweist.

Die Beschreibung, die Steuerung und die Schnittstellen der Module müssen so gestaltet sein, dass ein Zusammenwirken mit einer globalen Materialflussplanung möglich ist. Hierfür müssen die wesentlichen Eigenschaften für eine globale Materialflussplanung identifiziert und eine Beschreibungsform entwickelt werden. Es muss die Möglichkeit vorhanden sein, Entscheidungen an das Modul zu kommunizieren, damit das Modul diese umsetzt. Darüber hinaus müssen die Module in der Lage sein, sich selbstständig in ein aMFS zu integrieren.

Die globale Planung von Transporten erfordert ein Verständnis über die Abhängigkeit von Transporten in einem aMFS. Hierfür muss die Steuerung in der Lage sein, bereits bei der Planung von Transporten Abhängigkeiten in einem aMFS zu identifizieren und zu bewerten. Neben der globalen Planung von Materialflüssen soll das aMFS in der Lage sein, eine robuste Transportausführung zu gewährleisten und Blockaden zu vermeiden.

Diese Arbeit soll sich insbesondere auf den Aspekt konzentrieren, die gegenseitigen Abhängigkeiten zwischen Transport in einer Steuerung für aMFS zu berücksichtigen. Daher beschäftigt sich diese Arbeit mit der folgenden Forschungsfrage:

*Wie kann ein Steuerungskonzept für aMFS lokale und globale gegenseitige Abhängigkeiten zwischen Transporten berücksichtigen und somit die Leistungsfähigkeit des aMFS steigern?*

- *Welche Materialflussentscheidungen können lokal getroffen werden und bei welchen müssen globale Abhängigkeiten berücksichtigt werden?*
- *Welche Abhängigkeiten bestehen zwischen den Transporten in einem aMFS und wie groß ist der Einfluss auf die Leistungsfähigkeit?*
- *Wie kann ein Steuerungskonzept für aMFS diese Abhängigkeiten zwischen Transporten bereits in der Planungsphase berücksichtigen?*

Zur Beantwortung der Forschungsfrage wird ein Steuerungskonzept für aMFS benötigt. Da derzeit kein Steuerungskonzept existiert, das allen oben genannten Herausforderungen genügt, wird ein mögliches Steuerungskonzept im Rahmen dieser Arbeit entwickelt. Auf Basis des entwickelten Steuerungskonzepts erfolgt anschließend die Untersuchung der gegenseitigen Abhängigkeiten zwischen Transporten und die Entwicklung eines Vorgehens zur Berücksichtigung der Abhängigkeiten bei der Planung von Materialflüssen. Das Steuerungskonzept und das Vorgehen werden in einem Simulationsmodell implementiert und evaluiert.

## 4 Anforderungen an ein aMFS

---

In der Einleitung wurde bereits auf Einsatzszenarien für aMFS in zukünftigen Produktions- und Logistiksystemen eingegangen. In diesem Abschnitt werden Anforderungen an die Systemarchitektur, die Selbstkonfiguration, das Routing und die Koordination gestellt, die sich aus den zukünftigen Einsatzszenarien für aMFS ergeben.

### 4.1 Anforderungen an die Systemarchitektur

Die Anforderungen an die Systemarchitektur sind in Tabelle 4-1 zusammengefasst und im Folgenden beschrieben:

Im Bereich der automatisierten Produktion existieren diverse Ansätze zur Flexibilisierung von einzelnen Maschinen oder verketteten Produktionsprozessen, wie im Stand der Technik (vgl. 3.1.2) dargelegt. Das Prinzip der autonomen Module soll auch für aMFS übernommen werden. Somit bilden aMFS eine konsistente Ergänzung zu adaptiven Produktionssystemen, können aber auch eigenständig in Logistiksystemen eingesetzt werden. Hieraus leitet sich die Anforderung ab, dass Module autonom gestaltet sein und über eine eigene Steuerungshardware und -software verfügen sollen.

Autonome Module werden nach Bedarf beliebig kombiniert und das System erfordert eine Anpassung der Steuerungsarchitektur. Ansätze mit einer zentralen Steuerungsarchitektur kommen hier an ihre Grenze, da bei jeder Veränderung zum einen die Steuerungsarchitektur ohne Unterbrechung des operativen Betriebs angepasst werden muss. Zum anderen ist eine Funktionalität erforderlich, die den dynamischen Aufbau einer zentralen Steuerungsarchitektur ermöglicht. Daher soll auf eine zentrale Steuerungsarchitektur verzichtet werden. Dies schließt allerdings nicht aus, dass ein Modul zentrale Dienste für das aMFS oder einen Bereich erbringen kann.

Die Steuerungssoftware der Module wird entweder auf der eigenen Steuerungshardware ausgeführt oder auf einer zentralen Steuerungshardware, die zusammen mit dem ersten Modul im aMFS integriert werden muss. Im Falle einer zentralen Steuerungshardware muss das aMFS die Funktionalität besitzen, die Software neu hinzugefügter Module automatisch und ohne Beeinflussung des operativen Betriebs auf der zentralen Steuerungshardware zu installieren. Die zusätzliche Funktionalität erhöht die Komplexität der Steuerung und führt beim Ausfall der zentralen Steuerungshardware zu

einem Stillstand des gesamten aMFS. Durch zusätzliche Steuerungshardware in Reserve und einer Backup-Funktionalität ist die Steuerung des aMFS redundant auszuliegen. Die Verwendung einer zentralen Steuerungshardware und deren redundante Auslegung führt bei modularisierten Systemen zu einer erhöhten Komplexität der Software, um diese zusätzliche Funktion bereitzustellen. Vorangehend wurde bereits die Anforderung aufgestellt, dass Module über eine eigene Steuerungshardware verfügen. Daher soll eine verteilte Steuerung realisiert werden, bei der der geplante (z.B. Wartung) oder ungeplante (z.B. Störung) Ausfall eines Moduls keine Auswirkungen auf den operativen Betrieb der Steuerung hat.

Ziel ist es, aMFS ohne manuellen Programmier- oder Parametrieraufwand in Betrieb nehmen zu können. Dies soll nach dem Plug-and-Play Prinzip aus dem IT-Bereich erfolgen. Hierbei meldet sich ein Gerät nach dem Verbinden selbstständig am System an und konfiguriert die Schnittstellen zum System. Analog wurde für Produktionsanlagen das Konzept Plug-and-Produce entwickelt. Plug-and-Produce ermöglicht das Hinzufügen eines neuen Produktionsmoduls, das sich selbstständig im System anmeldet und seine Schnittstellen zu den anderen Produktionsmodulen einrichtet [Ara-2000, S. 1ff.]. Im Gegensatz zu Plug-and-Play aus dem Computer Bereich muss Plug-and-Produce für die Steuerung von Produktionsanlagen eine Echtzeitfähigkeit aufweisen und eine höhere Komplexität sowie Vielfalt bei der Konfiguration von Schnittstellen abdecken. Industrial Ethernet Protokolle sind heute in der Lage sowohl große Datenmengen als auch Echtzeitdaten zu übertragen. Somit sind Industrial Ethernet Protokolle für Plug-and-Produce und aMFS prädestiniert, da während der Konfiguration große Datenmengen übertragen werden und im operativen Betrieb die Echtzeitfähigkeit gefordert ist [Rei-2010, S. 2f.; Was-2016]. Hieraus leitet sich die Anforderung ab, dass die Systemarchitektur in der Lage sein muss neue Teilnehmer über Industrial Ethernet Protokolle im aMFS automatisch zu erkennen und den Selbstkonfigurationsprozess anzustoßen.

Die Steuerung von flexiblen Produktionssystemen erfolgt in der Regel über den Abgleich einheitlich beschriebener Fähigkeiten eines Moduls oder einer Gruppe von Modulen mit den Anforderungen eines Produktes. Für den Abgleich der Fähigkeiten und die Auswahl der Module eines Produktionsprozesses kommen verschiedene dezentrale Verfahren zum Einsatz [Ono-2006, S. 320f.]. Sowohl bei Produktionsprozessen als auch Materialflussprozessen ist die Einhaltung der Reihenfolge der Prozesse (Module) sowie das Erreichen eines kontinuierlichen Flusses (Minimierung der Wartezeiten zwischen den Prozessen) wichtig, um die Durchlaufzeit zu minimieren. Im Unterschied zu Produktionsprozessen ist bei Materialflussprozessen die Einhaltung der Reihenfolge nicht nur für eine TE (Produkt), sondern auch zwischen TE entscheidend. Ein

Produktionsmodul kann die Produktreihenfolge tauschen und die nachfolgenden Prozesse können trotzdem ausgeführt werden. Tauscht ein Materialflussmodul hingegen die Reihenfolge der TE, kann es z. B. an einer Kreuzung zu einer Verletzung der nachfolgend geforderten Sequenz kommen. Eine Sequenzverletzung führt dazu, dass TE in der falschen Reihenfolge an einem Ziel ankommen oder eine Blockierung entsteht. Die Materialflussprozesse der TE weisen also eine starke Abhängigkeit untereinander auf. Die Auswahl der Module für den Materialflussprozess darf nicht nur auf Basis der Fähigkeiten und Kapazität eines Moduls erfolgen, sondern muss auch die Materialflussprozesse der anderen TE berücksichtigen. Hieraus leitet sich die Anforderung ab, dass ein Modul eine globale Materialflussplanung und -koordination durchführen muss.

Tabelle 4-1: Anforderungen an die Systemarchitektur.

| Nummer     | Anforderung   |
|------------|---|
| <b>AS1</b> | Automatische Erkennung von neuen Modulen  |
| <b>AS2</b> | Gestaltung von autonomen Modulen  |
| <b>AS3</b> | Ausstattung der Module mit eigener Steuerungshardware und -software                         |
| <b>AS4</b> | Einsatz einer dezentralen Steuerungsarchitektur   |
| <b>AS5</b> | Verwendung einer verteilten Steuerung   |
| <b>AS6</b> | Durchführung einer globalen Materialflussplanung und -koordination durch Module             |
| <b>AS7</b> | Bereitstellung einer konsistenten Informationsbasis für globale Aufgaben                    |
| <b>AS8</b> | Vermeidung von unendlich verschachtelten Aufrufketten in der Kommunikation zwischen Modulen |
| <b>AS9</b> | Einrichtung einer Schnittstelle für den Empfang und die Quittierung von Transportaufträgen  |

Zur Durchführung von globalen Aufgaben sind die Module in der Lage zu kommunizieren. Eine verteilte Steuerung führt dazu, dass globale Aufgaben auf unterschiedlichen Modulen ausgeführt werden. Im Fall einer parallelen Ausführung von globalen Aufgaben auf unterschiedlichen Modulen muss sichergestellt werden, dass Module mit einer konsistenten Informationsbasis arbeiten. Der Nachrichtenaustausch zwischen zwei Modulen kann eine Kettenreaktion an Nachrichten auslösen, falls das Empfängermodul eine Anfrage nicht alleine beantworten kann. Hierbei besteht die Gefahr, dass Anfragen im Kreis geschickt werden oder es im Fall von Methodenaufrufen zu unendlichen Verschachtelungen kommt. In der Folge warten die Modulsteuerungen unendlich

lang auf eine Antwort oder es kommt zu einem Steuerungsabsturz. Um Systemstillstände durch unendlich verschachtelte Anfrageketten zu verhindern, muss entweder das erste Empfängermodul oder ein eindeutig definiertes Zielmodul am Ende einer Anfragekette die Anfrage selbstständig beantworten können.

aMFS verbinden verschiedene Punkte in einem Produktions- oder Logistiksystem miteinander und agieren als Dienstleister. Die Transportaufträge werden von den angebundenen oder übergeordneten Systemen erzeugt. Daher besteht die Anforderung, dass aMFS Aufträge von externen Systemen empfangen und quittieren können.

## 4.2 Anforderungen an die Gestaltung und Steuerung von autonomen Modulen

Die Anforderungen an die Selbstkonfiguration der Module sind in Tabelle 4-2 zusammengefasst und im Folgenden beschrieben:

Vor der Modularisierung eines Systems wird zunächst die Granularität der Module und damit der Modellierung festgelegt. Die Granularität beschreibt, wie fein ein System in einzelne Module unterteilt ist. Der Vorteil einer feineren Granularität besteht in der erhöhten Flexibilität, da mehr Kombinationsmöglichkeiten zwischen den Modulen existieren. Der Nachteil ist eine erhöhte Komplexität, da für die Durchführung einer Aufgabe mehr Module koordiniert werden müssen. Eine erhöhte Komplexität führt in der Regel zu einer geringeren Robustheit. Die Robustheit beschreibt dabei die Toleranz gegenüber ungeplanten Abweichungen, die z. B. durch fehlerhafte Beschreibungen von Eigenschaften oder Konfigurationen entstehen. Systeme mit einer geringen Robustheit fallen des Öfteren aus, wodurch die Effizienz sinkt. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 4-1 schematisch gezeigt.

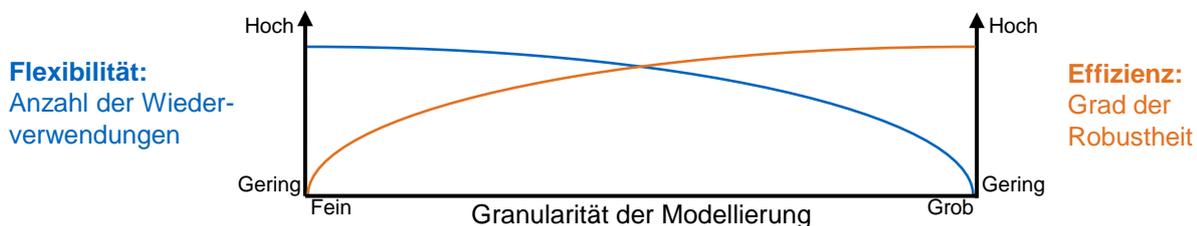


Abbildung 4-1: Zusammenhang zwischen Flexibilität und Effizienz in Abhängigkeit der Granularität der Modellierung nach [Szd-2002].

Derzeit existiert kein einheitliches Vorgehen zur Festlegung der Granularität einer Modellierung. Die Granularität hängt vom Einsatzfall und der geplanten Wiederverwendung ab [Mag-2011b, S. 9145ff.]. Hieraus leitet sich die Anforderung ab, Module für

aMFS im Bereich der Intralogistik einzusetzen, die in verschiedenen aMFS Layouts wiederverwendet werden können.

Die Module eines aMFS sind folglich in der Lage, sich flexibel auf das aktuelle aMFS Layout anzupassen. In Abhängigkeit des Layouts variieren die Anzahl der verbundenen Module, die Position der Schnittstellen und die Typen der verbundenen Module. Benachbarte Module sollen in der Lage sein, Materialflussschnittstellen zu bilden, mit denen eine TE von einem Modul zum anderen übergeben werden kann. Die Materialflussschnittstellen sollen selbstständig durch die Module konfiguriert werden können. Dafür müssen die Materialflussschnittstellen zum einen einheitlich beschrieben sein. Zum anderen muss ein vordefinierter Ablauf auf beiden Modulen vorliegen, um die Konfiguration der Materialflussschnittstellen einheitlich durchzuführen. Der Konfigurationsablauf soll in der Lage sein, verschiedene Typen an Materialflussschnittstellen robust zu konfigurieren.

Das Layout und die nutzbaren Materialflussschnittstellen beeinflussen die Funktionen, die ein Modul im System anbieten kann. Neben der reinen Transportfunktion sollen auch weitere logistische Funktionen berücksichtigt werden, wie z. B. Zusatzfunktionen, das Etikettieren oder Identifizieren, um die Aufgaben eines Logistiksystems vollständig abzubilden.

In Abhängigkeit des Layouts eines aMFS ergeben sich für die Ausführung eines Transports oder einer Funktion unterschiedliche operative Abläufe innerhalb eines Moduls. Je nach Position des Eingangs, des Ausgangs und der anzufahrenden Positionen innerhalb eines Moduls ergeben sich unterschiedliche Abläufe für das Zusammenspiel der Aktoren und Sensoren eines Moduls. Für ein Modul müssen daher in Abhängigkeit des Layouts und der Funktionalität im aMFS die operativen Abläufe flexibel eingerichtet werden. Bei der Entwicklung eines Moduls müssen die elementaren logistischen Operationen (Fähigkeiten) eines Moduls so beschrieben und ausführbar sein, dass sich die logistischen Operationen flexibel zu unterschiedlichen operativen Abläufen zusammenfügen lassen. Gleichzeitig sollen die operativen Abläufe, wie in Abbildung 4-1 dargestellt, eine hohe Robustheit aufweisen. In der Entwicklungsphase sollen logistische Operationen erstellt werden, die automatisch und flexibel zu verschiedenen logistischen Abläufen zusammengestellt werden können.

Verschiedene logistische Abläufe greifen gegebenenfalls auf dieselben Ressourcen zu, wie z. B. Motoren, oder stehen in einer gegenseitigen Abhängigkeit, z. B. TE blockieren sich gegenseitig bei der Ausführung. Die flexibel erstellten logistischen Abläufe müssen daher koordiniert werden, um gegenseitige Blockaden von TE oder den gleichzeitigen Zugriff auf dieselbe Ressource zu vermeiden.

In Abhängigkeit der Ausgestaltung eines Moduls kann die Leistung eines Moduls durch auf das Modul angepasste Koordinationsstrategien erhöht werden. Beispielsweise kann bei einem QVW eine günstige Reihenfolge der Aufträge die Leerfahrten minimieren und somit die Leistung des gesamten QVW steigern. Daher soll die Anwendung von Strategien für die Koordination der logistischen Abläufe ermöglicht werden.

Tabelle 4-2: Anforderungen an die Selbstkonfiguration der Module.

| Nummer      | Anforderung  |
|-------------|--|
| <b>AK1</b>  | Wiederverwendung von Modulen in verschiedenen aMFS Layouts           |
| <b>AK2</b>  | Konfiguration unterschiedlicher Anzahl an Nachbarmodulen             |
| <b>AK3</b>  | Konfiguration von Schnittstellen an unterschiedlichen Positionen     |
| <b>AK4</b>  | Konfiguration von verschiedenen Modultypen                           |
| <b>AK5</b>  | Konfiguration von Materialflussschnittstellen                        |
| <b>AK6</b>  | Bestimmung der Funktionalität für das aMFS                           |
| <b>AK7</b>  | Berücksichtigung von logistischen Zusatzfunktionen                   |
| <b>AK8</b>  | Flexible Erstellung der operativen Abläufe innerhalb eines Moduls    |
| <b>AK9</b>  | Anlegen von allgemeinen logistischen Operationen bei der Entwicklung |
| <b>AK10</b> | Koordination von flexibel erstellten logistischen Abläufen           |
| <b>AK11</b> | Anwendung von individuellen Modulstrategien für die Koordination     |

### 4.3 Anforderungen an das Routing und die Transportkoordination

Die Anforderungen an das Routing und die Transportkoordination sind in Tabelle 4-3 zusammengefasst und im Folgenden beschrieben:

Das aMFS soll in der Lage sein, eine Route von einem Start zu einem Ziel-Modul zu finden. aMFS sind dynamisch und ändern sich somit über die Zeit. Daher wird ein Routingverfahren benötigt, das mit häufigen Änderungen des Layouts zurechtkommt. Das Routingverfahren soll in der Lage sein, die Materialflussanforderungen an das aMFS zu erfüllen. Hierzu zählen zum einen zeitliche Aspekte, wie der Transport einer TE in der vorgegebenen Zeit, und zum anderen kapazitive Aspekte, wie der Transport der geforderten Menge an TE. Zeitliche und kapazitive Aspekte können, wie durch das Gesetz von *Little* (vgl. (2-1)) beschrieben, im Zielkonflikt zueinander stehen. aMFS

sollen zunächst die kapazitiven Aspekte priorisieren und anschließend die zeitlichen. Somit ist sichergestellt, dass möglichst viele TE ihr Ziel erreichen, aber nicht immer die zeitlichen Anforderungen erfüllen, wenn diese zu kurz gewählt sind. Um die Anforderungen an die Kapazität zu erfüllen, soll das Routingverfahren den Verkehr berücksichtigen, damit für alle Materialflusstrome ausreichend Kapazität bereitgestellt wird. Zusätzlich soll es möglich sein den Verkehr zu analysieren, um z. B. Engpässe zu identifizieren, und zu optimieren.

Neben der automatischen Ermittlung von Routen soll der Bediener in der Lage sein, manuelle Vorgaben zu machen. In einigen Situationen verfügt der Bediener über zusätzliches Wissen, mit dem er das aMFS effizienter steuern kann als es der Materialflusststeuerung möglich ist. Beispielsweise weiß der Bediener, dass in naher Zukunft eine ungewöhnlich große Lieferung eintrifft und temporär ein neuer, großer Materialflusstrom vom Wareneingang in das Lager durch das aMFS führt. In diesem Fall kann es sinnvoll sein, das aMFS temporär manuell zu übersteuern. Ebenso ist es möglich, dass der Bediener externe Optimierungsprogramme oder seine Erfahrung nutzen möchte, um das aMFS zu optimieren. Darüber hinaus schafft die manuelle Eingriffsmöglichkeit eine zusätzliche Akzeptanz beim Bediener, da die höchste Entscheidungsgewalt beim Bediener liegt und er ein ungewolltes Systemverhalten übersteuern kann.

Die Eigenschaften eines Transports durch ein Modul variieren auch in Abhängigkeit der aktuellen Konfiguration des Moduls im aMFS. Insbesondere bei größeren Modulen variiert beispielsweise die Transportzeit durch das Modul abhängig davon, an welcher Stelle eine TE in das Modul ein- und austritt und wie lang der Weg durch das Modul ist. Somit müssen bei der Routenplanung die Ein- und Austrittspunkte eines Moduls berücksichtigt werden. Einige Module benötigen eine Vorbereitungszeit, bevor ein Transport ausgeführt wird. Beispielsweise richtet sich ein Drehtisch zunächst zum Eingang aus, bevor die Übergabe einer TE startet. In Abhängigkeit der aMFS-Konfiguration blockiert eine TE das Vorgänger-Modul bis das Nachfolger-Modul bereit ist. Die Vorbereitungszeit muss bei der Routenfindung daher ebenfalls berücksichtigt werden.

Befinden sich mehrere TE gleichzeitig in einem aMFS, kann es zu Ressourcenkonflikten kommen. Ein Ressourcenkonflikt tritt auf, wenn mehrere TE zur selben Zeit auf dasselbe Modul zugreifen möchten und die Kapazität des Moduls dafür nicht ausreicht. Im einfachsten Fall tritt der Ressourcenkonflikt nur auf einem Modul auf und kann durch das Verzögern einer TE aufgelöst werden. Im komplexen Fall erstreckt sich der Ressourcenkonflikt über mehrere Module und durch das Verzögern einer TE entstehen wiederum neue Ressourcenkonflikte an anderer Stelle. Ein Ressourcenkonflikt liegt beispielsweise vor, wenn zwei TE zur selben Zeit eine bidirektionale Strecke in entgegengesetzter Richtung nutzen möchten, auf der es keine Ausweichmöglichkeit

gibt. Ressourcenkonflikte beeinträchtigen die Kapazität von Modulen und müssen daher berücksichtigt werden.

Bei der Ausführung eines Transports darf es zu keiner Blockade kommen, die nicht aufgelöst werden kann. Der Betreiber eines aMFS stellt sein individuelles Layout zusammen, so dass auch Blockaden auftreten können. Daher müssen Blockaden durch die Steuerung verhindert oder aufgelöst werden, um einen Stillstand des aMFS durch eine Blockade zu verhindern. Einige Anwendungen von aMFS verlangen die Anlieferung von TE zu einem definierten Zeitpunkt. Daher muss die Transportkoordination in der Lage sein, Transportzeiten zu ermitteln und Anlieferungen zu einem vorgegebenen Zeitpunkt an einem Ziel Modul zu ermöglichen. Eine weitere Bedingung ist die Anlieferung von mehreren TE in einer vorgegebenen Sequenz, wie sie z. B. bei der Palettierung häufig gefordert wird.

Der Ausfall eines Moduls führt zu Beeinträchtigungen des operativen Betriebs eines aMFS und zu ungewollten Systemzuständen wie z. B. Blockaden. Beim Ausfall eines Moduls muss das aMFS in der Lage sein, die ungewollten Systemzustände zu erkennen, aufzulösen und das aMFS wieder in einen Normalzustand zu überführen.

Tabelle 4-3: Anforderungen an das Routing und die Transportkoordination in einem aMFS.

| Nummer      | Anforderung  |
|-------------|--|
| <b>AT1</b>  | Berücksichtigung von Layoutänderungen durch das Routingverfahren                                     |
| <b>AT2</b>  | Berücksichtigung von Verkehr durch das Routingverfahren  |
| <b>AT3</b>  | Manuelle Übersteuerung des aMFS durch den Bediener   |
| <b>AT4</b>  | Durchführung von Verkehrsanalysen und -optimierungen   |
| <b>AT5</b>  | Aufschlüsselung der Transporteigenschaften in Abhängigkeit der Ein- und Austrittspunkte eines Moduls |
| <b>AT6</b>  | Berücksichtigung von Vorbereitungszeiten   |
| <b>AT7</b>  | Berücksichtigung von Ressourcenkonflikten  |
| <b>AT8</b>  | Ausschließen von Stillständen des aMFS durch Blockaden   |
| <b>AT9</b>  | Ankunft von TE zu einem vorgegebenen Zeitpunkt am Ziel-Modul   |
| <b>AT10</b> | Anlieferung von TE in einer vorgegebenen Sequenz am Ziel-Modul                                       |
| <b>AT11</b> | Kompensation des Ausfalls von Modulen  |

## 5 Systemarchitektur für ein aMFS

---

aMFS bestehen aus einzelnen Modulen, die in der Lage sind selbstständig Funktionen auszuführen. Dieses Kapitel beschreibt und definiert ein solches Modul. Für das Zusammenspiel mehrere Module in einem aMFS bedarf es einer Steuerungsarchitektur, für die in diesem Kapitel ein Konzept auf Basis von [Lie-2018a], [Fis-2019], [Vog-2019] und [Fis-2020] hergeleitet wird. Abschließend erfolgt eine Betrachtung der Schnittstelle zu externen Systemen.

### 5.1 Autonome Materialflussmodule

Im vorangegangenen Abschnitt wird gefordert, dass ein aMFS aus autonomen Modulen aufgebaut ist. Eine Kernfrage ist hierbei die Granularität der Module. Für aMFS wird die funktionsorientierte Modularisierung nach Wilke angewendet [Wil-2006, S. 29ff.]. Die funktionsorientierte Modularisierung zieht die Systemgrenzen eines Moduls nach der Funktionalität (Aufgabe) des Moduls. In einem aMFS ist die Aufgabe jedes Moduls der Transport. Neben dem Transport sind Module in der Lage, Zusatzfunktionen wie z. B. das Identifizieren, Etikettieren oder Wiegen auszuführen. Daraus ergibt sich die Granularität, dass ein Modul mindestens den Transport einer TE autonom durchführen muss. Es wird nicht ausgeschlossen, dass Module auch gröber gestaltet werden dürfen und z. B. den Transport von mehreren TE gleichzeitig ausführen. Der Vorteil eines solch grob gestaltenden Moduls wird im späteren Verlauf der Arbeit beschrieben. Eine feinere Granularität wird an dieser Stelle ausgeschlossen. Die zusätzliche Flexibilität wird für ein autonomes Modul in einem aMFS nicht benötigt, da das Modul ausschließlich auf die Aufgabe Transport ausgelegt ist. Durch die zusätzliche Flexibilität ergeben sich eventuell Übergaben zwischen Modulen, die bei der Entwicklung eines Moduls nicht vorgesehen waren. Solche neuen Übergaben steigern zwar die Flexibilität des aMFS, erfordern aber eine aufwendige Implementierung zur Prüfung und Ausführung der Übergabe. Der Fokus von aMFS liegt auf der Leistungsfähigkeit des Materialflusses und robusten Prozessen. In einem aMFS werden nur Übergaben zwischen Modulen durchgeführt, die in der Entwicklungsphase freigegeben werden. Die Freigabe von Übergaben und die vorhandene Flexibilität werden in einem späteren Abschnitt dieser Arbeit detailliert betrachtet. Ein autonomes Materialflussmodul (aMFM) setzt sich folglich, wie in Abbildung 5-1 beispielhaft gezeigt, aus den Komponenten Mechanik, Steuerungshardware und -software zusammen. In einem aMFS verfügt ein aMFM über die Schnittstellen Mechanik (Übergabe von TE), Energie (Stromversorgung) und Steuerung (Datenaustausch).

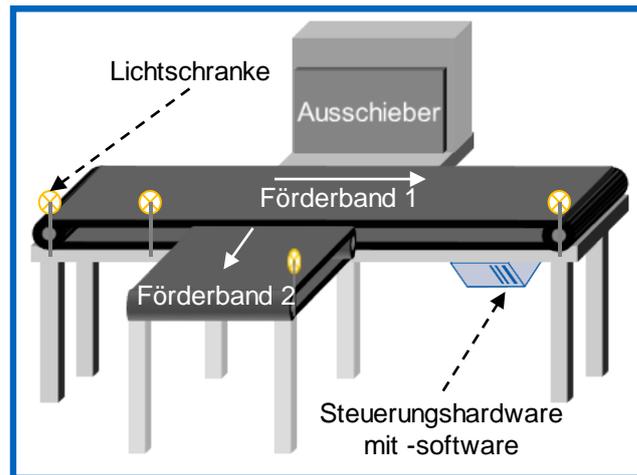


Abbildung 5-1: Beispiel eines aMFM, aufgebaut aus Mechanik-Komponenten (Förderbänder, Lichtschranken und Ausschieber), Steuerungshardware und -software.

Ein aMFM erfüllt somit die Kriterien der funktionsorientierten Modularisierung, da sich ein aMFS in einzelne aMFM zerlegen lässt, sich die aMFM unabhängig voneinander kombinieren lassen, die Funktion für einen Anwender verständlich ist, Änderungen und Fehler im Inneren eines aMFM abgekapselt vom übrigen System sind, alle Komponenten die gleiche Systemgrenze haben und ein aMFM in der Lage ist, eine Funktion auch ohne Einbindung in ein aMFS auszuführen [Wil-2006, S. 31]. Hierdurch erfüllt ein aMFM die Anforderungen AS2 und AS3.

aMFM besitzen eine Wissensbasis, in der die Eigenschaften und Fähigkeiten des aMFM hinterlegt sind, die im weiteren Verlauf dieser Arbeit thematisiert sind. Die Ausgestaltung der Struktur der Wissensbasis ist nicht Bestandteil dieser Arbeit. Hier kann auf verschiedene Vorarbeiten aufgebaut werden, wie z. B. auf allgemeingültige Standards der Automatisierungstechnik wie AutomationML [Lüd-2017, S. 213ff.], der Systemarchitektur für die Intralogistik (SAIL) [VDI-5100] und dem Metamodell für zentral oder dezentral gesteuerte Materialflussmodule AutoMFM [Aic-2016, S. 1544ff.; Aic-2018, S. 59ff.; Aic-2021].

## 5.2 Steuerung von aMFM durch ein MAS

Für die Steuerung von aMFM bieten sich Softwareagenten an, die jeweils ein aMFM im aMFS repräsentieren. Softwareagenten agieren autonom, passen sich der aktuellen Situation an und sind in der Lage, miteinander in einem MAS zu kooperieren. Daher eignen sich MAS für die Steuerung von modular aufgebauten Systemen, deren Module autonom handeln und miteinander kooperieren [Vog-2015, S. 778f.]. Dies wurde auch bereits in diversen Forschungsprojekten im Bereich der Produktion realisiert [Lei-2009, S. 979ff.]. In einem aMFS arbeiten mehrere aMFM und damit Agenten zusammen an

einer Aufgabe (Transport) und formen somit ein MAS. Charakteristisch für MAS ist die dezentrale und verteilte Ausführung von Aufgaben. Somit erfüllen MAS die Anforderungen AS4 und AS5 einer dezentralen Steuerungsarchitektur, die über mehrere Recheneinheiten verteilt ausgeführt wird. Der Agent eines physischen aMFM ist folglich in der Lage, autonom die Aufgabe eines aMFM auszuführen und mit anderen Agenten zusammenzuarbeiten, um aMFM-übergreifende Aufgaben zu koordinieren und auszuführen.

Im Bereich der Produktion definierten *Vallée et al.*, wie in Abbildung 5-2 gezeigt, für ein modular aufgebautes System einen Automatisierungsagenten als Modul. Der Automatisierungsagent setzt sich aus den physischen Komponenten und der Software zusammen und entspricht somit einem aMFM [Val-2009, S. 306f.]. Die Software-Komponente ist nochmals in eine untere und eine obere Steuerungsebene unterteilt. Die untere Steuerungsebene steuert die physischen Komponenten wie Aktoren und Sensoren an und verfügt nur über ein begrenztes Spektrum an Funktionen. Die untere Steuerungsebene besitzt die Eigenschaft, in Echtzeit auf Sensorwerte zu reagieren. Die obere Steuerungsebene koordiniert Aufgaben mit anderen Agenten im System und ist für die Erreichung der eigenen vordefinierten Ziele im System verantwortlich. Die obere Steuerungsebene agiert global und verfügt daher über standardisierte Schnittstellen zu anderen Agenten, die z. B. nach FIPA definiert sind. Die Schnittstelle zwischen der unteren und oberen Steuerungsebene in einem Automatisierungsagenten wird über einen gemeinsam genutzten Speicher hergestellt [Oro-2007, S. 50ff.].

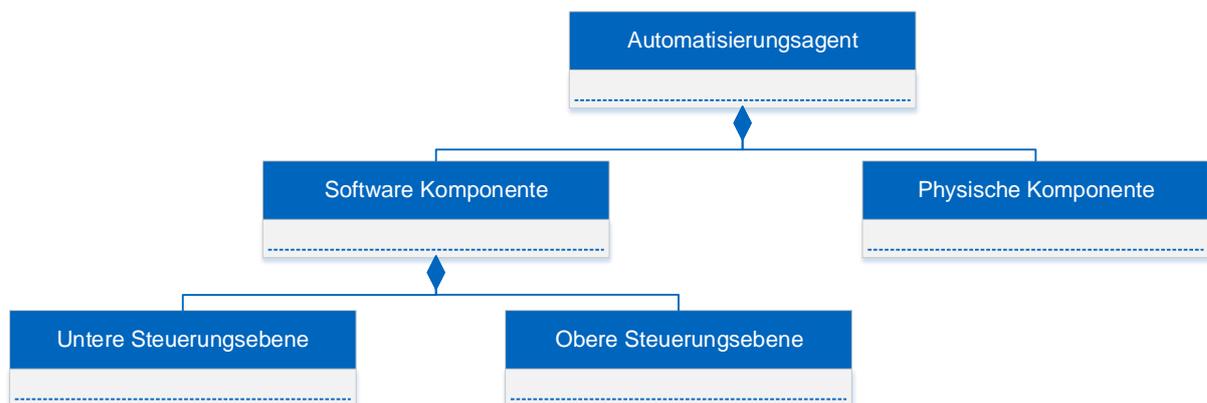


Abbildung 5-2: Bestandteile eines Automatisierungsagenten in einem UML-Klassendiagramm nach [Val-2009, S. 306].

Die Trennung zwischen einer reaktiven unteren und einer proaktiv handelnden oberen Steuerungsebene ist für aMFM ebenfalls geeignet. Hierdurch wird die Anforderung AS6 erfüllt, eine globale Materialflussplanung und -koordination in einem aMFS durchzuführen. Die Aufgaben der oberen Steuerungsebene in einem aMFM lassen sich

klassifizieren und unabhängig voneinander ausführen. Daher wird die obere Steuerungsebene in mehrere Subebenen unterteilt. In der Folge ergibt sich ein Agent mit hierarchischen Ebenen und insgesamt einer hybriden Architektur. Die Agenten sind intern hierarchisch (zentral) aufgebaut, agieren aber global auf einer Ebene (dezentral). Die hierarchisch aufgebaute Agentenstruktur vermeidet Interessenskonflikte, da die Entscheidung einer höheren Ebene Vorrang vor der Entscheidung einer niedrigeren Ebene hat [Car-1996, S. 52ff.]. In einem aMFM verhindert eine hohe Ebene beispielsweise Blockierungen und alle Entscheidungen der unteren Ebenen müssen im Einklang stehen, so dass eine Blockierung nicht mehr durch untere Ebenen ausgelöst werden kann. Für ein aMFM ergeben sich folgende Ebenen, deren Beziehung untereinander in Abbildung 5-3 gezeigt ist:

- **Materialflussebene** (obere Steuerungsebene): Koordination des Materialflusses in einem aMFS mit anderen aMFM
- **Funktionsebene** (obere Steuerungsebene): Aufgabenkoordination innerhalb eines aMFM und Erstellung eines Ablaufprogramms
- **Systemebene** (untere Steuerungsebene): Ausführung eines vorgegebenen Ablaufprogramms
- **Konfigurationsebene** (obere Steuerungsebene): Etablierung und Überwachung der Schnittstellen zu benachbarten aMFM

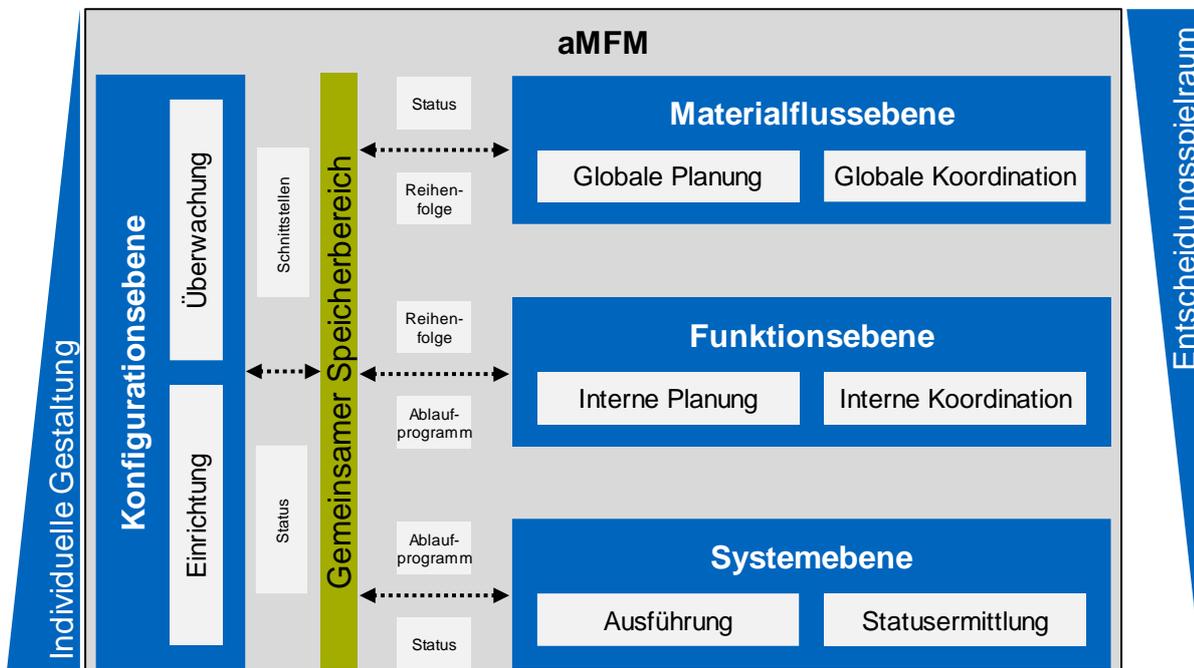


Abbildung 5-3: Aufbau eines Software Agenten für ein aMFM in Anlehnung an [Fis-2020].

Die Materialflussebene ist zuständig für die Planung und Koordination des Materialflusses. Die Planung umfasst proaktive Aufgaben, wie die Bestimmung einer Route

durch das aMFS in Abhängigkeit der anderen Routen zur Vermeidung von Überlastungen an einem aMFM. Die Koordination vermeidet Konflikte wie Blockierungen, die z. B. bei der gleichzeitigen Ausführung von zwei entgegengesetzten Transporten auf demselben aMFM entstehen. Die Materialflussebene legt schlussendlich fest, in welcher Reihenfolge und über welches benachbarte aMFM Transporte ein aMFM erreichen und wieder verlassen. Die Reihenfolge wird über den gemeinsamen Speicherbereich den anderen Ebenen zur Verfügung gestellt. Die Planung und Koordination des Materialflusses ist eine globale Aufgabe und wird zwischen mehreren aMFM in einem aMFS durch Kommunikation gelöst. In der Materialflussebene sind auch die Materialflusstراتيجien für ein aMFS implementiert. Für eine konsistente Planung und Koordination sowie Umsetzung einer Materialflusstategie ist die Materialflussebene auf jedem aMFM identisch implementiert, unabhängig vom Typ eines aMFM. Wird die Materialflusstategie manuell geändert, muss die Materialflussebene auf allen aMFM in einem aMFS geändert werden.

Die Funktionsebene plant und koordiniert die Aufgaben innerhalb eines aMFM. Im Gegensatz zur Materialflussebene unterscheidet sich die Funktionsebene eines aMFM von Typ zu Typ. Die Funktionsebene ermöglicht es aMFM eigene Ausführungsstrategien anzuwenden, die unabhängig vom globalen Materialfluss umgesetzt werden. Die interne Planung und Koordination kommt beispielsweise zum Tragen, wenn ein aMFM mehrere Transporte gleichzeitig ausführen kann, aber nur über einen Scanner verfügt. Die Funktionsebene legt selbstständig fest, in welcher Reihenfolge der Scanner durch die TE genutzt werden darf. Die Funktionsebene ist auch dafür verantwortlich ein Ablaufprogramm zu erstellen. Im Ablaufprogramm wird festgelegt, welche Funktionen, in welcher Reihenfolge und mit welchen Parametern ausgeführt werden müssen. Die Funktionsebene übersetzt somit das Ergebnis der globalen Materialflussplanung in konkrete Arbeitsschritte. Das festgelegte Ablaufprogramm wird im gemeinsamen Speicherbereich abgelegt. Zusätzlich ermittelt die Funktionsebene Kennzahlen wie z. B. die aktuellen Transportzeiten, die die Materialflussebene für die Planung und Koordination verwendet.

Die untere Ebene wird in dieser Arbeit als Systemebene bezeichnet. Die Systemebene ist dafür verantwortlich, ein modulares Ablaufprogramm auszuführen, das von der Funktionsebene vorgegeben wird. Die Systemebene eines aMFM ist am individuellsten gestaltet und hängt von der Art und dem Umfang der Funktionalitäten ab. Der Handlungsspielraum ist auf der Systemebene eingeschränkt, da die oberen Ebenen Entscheidungen mit dem größten Einfluss auf die Leistungsfähigkeit und Durchlaufzeit einer TE treffen. Die Systemebene meldet den Status der Ausführung über den gemeinsamen Speicherbereich zurück an die oberen Ebenen.

Die Konfigurationsebene ist dafür verantwortlich, ein aMFM im aMFS anzumelden und die Schnittstellen zu anderen aMFM einzurichten. Schnittstellen werden zentral für alle Ebenen eingerichtet und in einem gemeinsamen Speicherbereich abgelegt. Für die Materialflussebene wird z. B. die Topologie des aMFS ermittelt und zur Verfügung gestellt und der Funktionsebene wird die Position und Art der Schnittstellen zu benachbarten aMFM mitgeteilt. Neben der initialen Konfiguration eines aMFM erfolgt eine Überwachung der Konfiguration. Treten Änderungen im aMFS auf, werden die Auswirkungen auf die Konfiguration des aMFM geprüft und gegebenenfalls angepasst.

Durch die Nutzung eines gemeinsamen Speicherbereichs zur Kommunikation zwischen den Ebenen wird verhindert, dass innerhalb eines aMFM verschachtelte Aufrufketten entstehen. Die Materialflussebene muss verschachtelte Aufrufketten über die Definition einer geeigneten Kommunikationsontologie ausschließen, um Anforderung AS8 vollständig zu erfüllen.

### **5.3 Zentrale Koordinator-Instanz**

Die Planung der Materialflüsse erfolgt global und verteilt auf verschiedenen aMFM. Dabei besitzt jedes aMFM zunächst nur begrenztes Wissen über das System. Das Wissen beschränkt sich auf die Informationen, die ein aMFM über eigene Sensoren sammelt, zu Beginn hinterlegt sind oder mit anderen aMFM ausgetauscht werden. Für die Planung und Koordination der Materialflüsse unter Berücksichtigung der gegenseitigen Abhängigkeiten ist vollständiges globales Wissen über das aMFS erforderlich. Zu diesem Zweck ist ein Informationsaustausch zwischen allen aMFM in einem aMFS erforderlich. Kommuniziert jedes aMFM eigenständig mit allen anderen aMFM, um globales Wissen zu ermitteln, führt dies beim Zusammenstellen und Aktualisieren des Wissens zu einer hohen Kommunikationslast im System [Lie-2016]. Durch die verteilte Planung arbeiten mehrere aMFM parallel an einer Planung und sind darauf angewiesen, mit demselben Wissensstand zu arbeiten, um zu konsistenten Ergebnissen zu gelangen. Eine zentrale, koordinierende Instanz ermöglicht eine Reduzierung der Kommunikationslast und die Bereitstellung eines einheitlichen Wissensstands (vgl. Abbildung 5-4). In einigen standardisierten Konzepten zur Umsetzung von MAS ist eine zentrale, koordinierende Instanz zur Verwaltung der Agenten in einem System vorgesehen, wie z. B. im FIPA Standard [Fou-2004, S. 6ff.]. Nach diesem Vorbild erfolgt die Verwaltung der aMFM ebenfalls in einer zentralen Koordinator-Instanz, im Folgenden Koordinator genannt. Der Koordinator erfüllt die Anforderung AS7 nach einer einheitlichen Informationsbasis für globale Verwaltungs- und Planungsaufgaben für konsistente Ergebnisse.

Der Koordinator bietet eine zentrale Stelle, an die sich neue aMFM im aMFS oder externe Systeme wenden. Der Koordinator besitzt einen vollständigen administrativen Systemüberblick und ist somit in der Lage, neue aMFM zu integrieren und Anfragen externer Systeme zu bearbeiten oder weiterzuleiten. Zu den administrativen Aufgaben gehört beispielsweise die Erkennung und Registrierung neuer aMFM sowie das Anstoßen des Konfigurationsprozesses. Der Koordinator erfüllt die Anforderung AS1 neue Module zu erkennen und den Konfigurationsprozess zu starten.

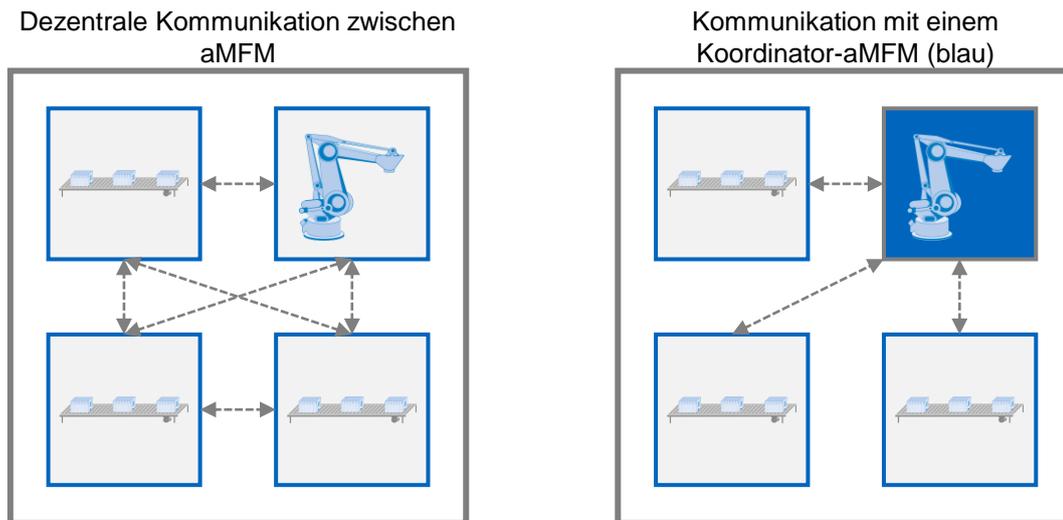


Abbildung 5-4: Darstellung der Kommunikation in einem aMFS mit und ohne Koordinator-aMFM.

Der Koordinator ist als eigener Agent gestaltet und läuft auf der Rechenhardware eines beliebigen aMFM. Eine zentrale Instanz birgt das Risiko, dass bei einem Ausfall das gesamte aMFS zum Stillstand kommt. Ein weiterer Nachteil ist die nicht vorhandene Skalierbarkeit eines zentralen Koordinators, so dass der Koordinator zum Engpass bei der Kommunikation und Berechnung wird. Daher wird nach *Regulin et al.* ein dynamisch aktivierbarer Koordinator-Agent eingesetzt. Auf jedem aMFM läuft der Koordinator-Agent und somit ist jedes aMFM in der Lage als Koordinator zu agieren. Allerdings ist der Koordinator nur auf einem aMFM aktiv. Das Koordinator-aMFM wird z. B. nach der Leistungsfähigkeit der Rechenhardware ausgewählt und ist allen anderen aMFM bekannt. Ein neues aMFM prüft ob es bereits ein Koordinator-aMFM gibt. Falls das neue aMFM das erste aMFM im aMFS ist, wird es automatisch zum Koordinator-aMFM. Fällt das Koordinator-aMFM aus, erkennen die anderen aMFM dies automatisch und bestimmen ein neues aMFM zum Koordinator [Reg-2016, S. 135ff.].

Das Wissen des Koordinators besteht aus der Aggregation der gesammelten Informationen im aMFS. Daher ist ein neuer Koordinator in der Lage, dasselbe Wissen wieder durch Kommunikation mit den aMFM zu aggregieren und es gehen keine Informatio-

nen verloren. Lediglich die Ausfallzeit des Koordinators und die temporär erhöhte Kommunikationslast führen zu einer Beeinträchtigung im aMFS. Der Koordinator wird nur für Verwaltungs- und Planungsaufgaben eingesetzt, daher läuft während der Ausfallzeit und Einrichtung eines neuen Koordinators die Ausführung der Transporte weiter. Lediglich die Integration neuer aMFM und die Planung neuer Transporte wird verzögert. Der Ausfall eines aMFM ist kein regelmäßig auftretendes Ereignis, daher werden die temporären Beeinträchtigungen als akzeptabel beurteilt.

Um die mangelnde Skalierbarkeit des zentralen Koordinator-Agenten auszugleichen, werden im Folgenden Gestaltungsgrundsätze für den Koordinator aufgestellt. Die Stärke des Koordinators liegt in der kommunikationseffizienten Beschaffung und Bereitstellung einheitlicher Informationen im aMFS. Daher soll die Aufgabe des Koordinators auf die Beschaffung und Bereitstellung von Informationen beschränkt werden. Sämtliche Verarbeitungsprozesse werden verteilt im aMFS von anderen aMFM durchgeführt. Informationen werden durch den Koordinator nicht proaktiv gesendet, sondern nur bei Bedarf von den aMFM angefragt und zur Verfügung gestellt. aMFM schicken an den Koordinator selbst nur Aktualisierungen, wenn hierdurch signifikante Änderungen im Entscheidungsprozess zu erwarten sind. Die Gestaltungsregeln sind im Folgenden noch einmal zusammenfasst und werden im weiteren Verlauf der Arbeit angewendet:

- Verteilte Ausführung von Verarbeitungsprozessen
- Informationsbereitstellung durch den Koordinator nur nach Bedarf
- Aktualisierung durch aMFM nur bei signifikanten Änderungen

Die Anforderungen an den Koordinator für die Kommunikation und Berechnung steigen mit zunehmender Anzahl an aMFM in einem aMFS. Allerdings steigt damit auch die Wahrscheinlichkeit, dass im aMFS ein aMFM mit einer leistungsfähigen Rechenhardware integriert ist.

## 5.4 Schnittstellen zu externen Systemen

aMFS führen Transportaufträge als Dienstleistung aus, die von übergeordneten Systemen wie einem WMS oder angeschlossenen Stationen wie Fertigungsmaschinen oder Logistikarbeitsplätzen generiert werden. Derzeit existiert eine Vielzahl von unterschiedlichen Schnittstellen für die Vernetzung von Logistik- und Fertigungssystemen. Vor dem Hintergrund der Vernetzung in der Industrie 4.0 wird zwar an einer Standardisierung der Systemschnittstellen gearbeitet, wie z. B. zur Vernetzung von Produkti-

onsmaschinen [Sch-2015, S. 87ff.], allerdings hat sich bisher kein Standard durchgesetzt. In dieser Arbeit steht nicht die technische Gestaltung der Schnittstelle im Fokus, sondern die Funktionsweise. Daher wird davon ausgegangen, dass sich in Zukunft ein einheitlicher Standard durchsetzen wird oder die Schnittstelle muss für jedes aMFS einmalig manuell implementiert werden, um Anforderung AS9 zu erfüllen. In Abbildung 5-5 ist die beispielhafte Struktur eines Transportauftrages in Anlehnung an [Lib-2011, S. 78] abgebildet.

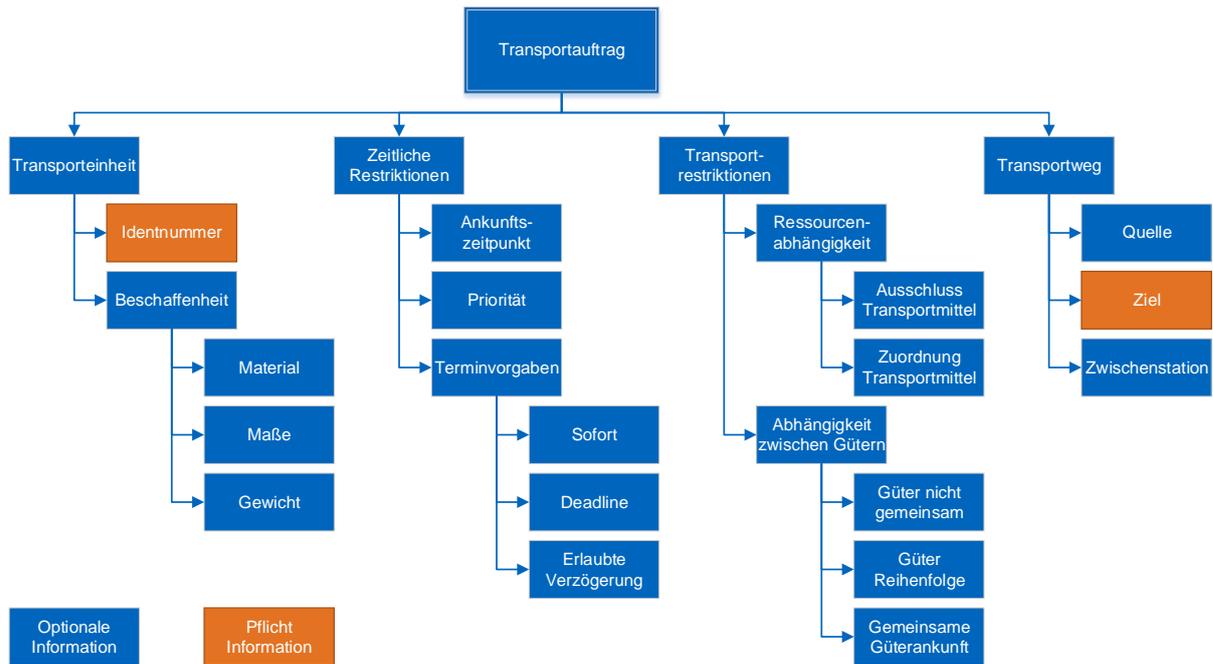


Abbildung 5-5: Informationen und Struktur eines Transportauftrages in Anlehnung an [Lib-2011, S. 78].

Das aMFS benötigt mindestens die Identnummer (ID) einer TE und das Ziel, um einen Transport auszuführen. Die weiteren Informationen sind optional und im Folgenden mit einem beispielhaften Verwendungszweck erläutert:

- Identnummer: Eindeutige Nummer zur Identifikation einer TE im aMFS
- Beschaffenheit: Ausschluss technisch ungeeigneter aMFM
- Ankunftszeitpunkt: Ankunft der TE im aMFS
- Priorität: Bevorzugter Transport von Eilaufträgen
- Terminvorgaben: Festlegung der Ankunftszeit am Ziel
- Ressourcenabhängigkeit: Ausschluss von Transportmitteln wie Kettenförderer aufgrund der Vibrationen
- Abhängigkeit zwischen Gütern: Festlegung der Reihenfolge am Ziel
- Quelle: Eintritt in das aMFS
- Senke: Austritt aus dem aMFS
- Zwischenstation: Realisierung von Workflows wie dem Etikettieren einer TE

Externe Systeme oder angeschlossene Stationen schicken Transportaufträge an das aMFS oder hinterlegen den Transportauftrag auf einem Transponder, der an der TE befestigt ist. In einigen Projekten wurden in einem MAS Produkt-Agenten eingesetzt, um einen Auftrag im System zu koordinieren, wie z. B. die Auswahl von Ressourcen durchzuführen oder die Einhaltung von zeitlichen Restriktionen zu überwachen. Die aMFM sind in der Lage, eigenständig Transporte zu planen und zu koordinieren und benötigen daher keine weitere Koordinationsinstanz. Produkt-Agenten erfordern zusätzlich eine Rechenhardware. In einem aMFS mit einer verteilten Steuerung und Rechenhardware, muss daher ein Programm implementiert werden, das die Verteilung der Produkt-Agenten auf die Rechenhardware steuert. Hierdurch wird zusätzliche Komplexität in die Steuerung des aMFS eingebracht. Eine andere Lösung ist die Ausstattung von TE mit einer Rechenhardware, auf der der Produkt-Agent läuft. Dies erfordert aber eine zusätzliche Investition in die TE und schränkt den Transport auf TE ein, die speziell für das aMFS ausgestattet sind. In der vorgeschlagenen Systemarchitektur wird auf einen Produkt-Agenten verzichtet. Neue Transportaufträge werden durch das empfangende aMFM an den Koordinator weitergeleitet. Der Koordinator informiert anschließend die beteiligten aMFM (Start und Ziel) über den Transportauftrag und erhält von diesen Aktualisierungen des Status, die wiederum an externe Systeme zurückgespielt werden.

## 6 Entwicklung, Inbetriebnahme und Steuerung von aMFM mit Transportabhängigkeiten

Die Materialflussebene plant einen Transport ein, der durch die Funktions- und Systemebene ausgeführt wird. Hierfür koordinieren und steuern die Funktions- und Systemebene den internen Ablauf eines aMFM sowie die Schnittstellen zu verbundenen benachbarten aMFM. Nach dem Hinzufügen eines aMFM zu einem aMFS konfigurieren aMFM zunächst die Funktions- und Systemebene. Die Funktions- und Systemebene arbeiten für die physische Ausführung eines Transports eng zusammen. Daher betrachtet dieses Kapitel die beiden Ebenen sowie die hierfür benötigten Funktionen der Konfigurationsebene gemeinsam. Ein aMFM durchläuft die drei zeitlichen Phasen Entwicklung, Inbetriebnahme und Betrieb, auf die im Folgenden eingegangen wird und deren Abfolge in Abbildung 6-1 gezeigt ist. Die Grundlagen des Kapitels wurden bereits in [Lie-2018a] und [Lie-2019] beschrieben.

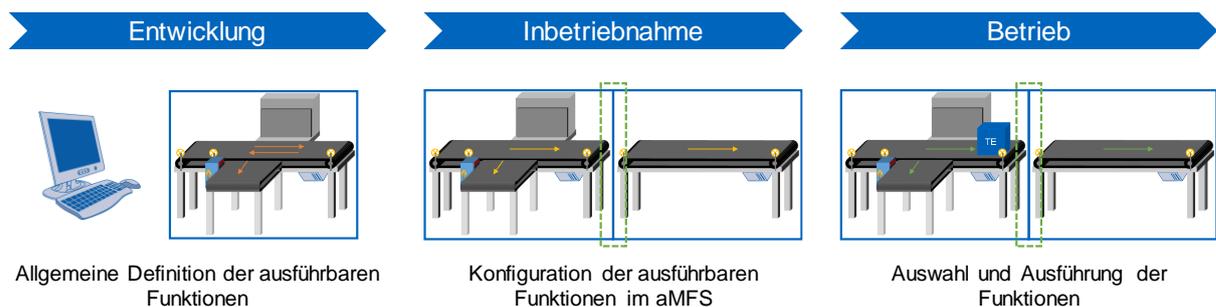


Abbildung 6-1: Abfolge der aMFM Phasen Entwicklung, Inbetriebnahme und Betrieb.

In diesem Kapitel soll beantwortet werden, welche Materialflussentscheidungen das aMFM lokal trifft, welche Abhängigkeiten sich zwischen den Transporten innerhalb eines aMFM ergeben, welche Koordinationsaufgaben das aMFM wahrnimmt und welchen Handlungsspielraum ein aMFM besitzt.

Die Entwicklung von aMFM ist im Folgenden beispielhaft anhand einer T-Kreuzung erläutert. Die T-Kreuzung besteht aus zwei Förderbändern mit separaten Antrieben und einem Ausschieber für seitliche Ausschleusungen, wie in Abbildung 6-2 links räumlich und rechts schematisch dargestellt. Zusätzlich ist das interne aMFM-Koordinatensystem eingezeichnet.

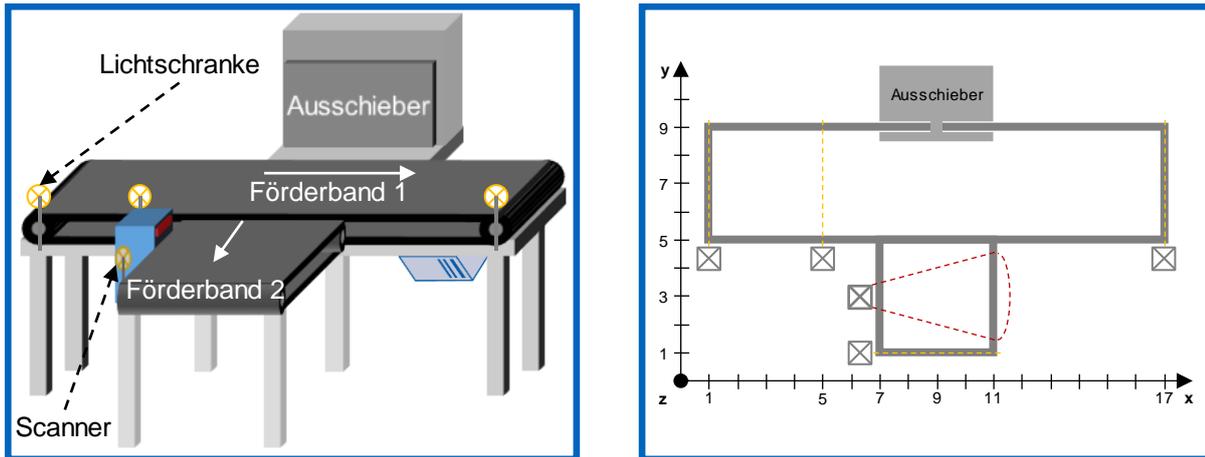


Abbildung 6-2: Räumliche und Schematische Darstellung mit internem aFMF-Koordinatensystem einer T-Kreuzung mit zwei Förderbändern und einem Ausschieber.

## 6.1 Entwicklungsphase: Definition und Beschreibung der logistischen Operationen

Logistische Operationen (LO) beschreiben die elementarsten Fähigkeiten eines aFMF. LO beschreiben die Interaktion zwischen einem aFMF und einer TE, die transportiert oder für eine Zusatzfunktion bereitgestellt wird. Ein aFMF verfügt über mindestens eine LO und die maximale Anzahl an LO hängt von der technischen Ausgestaltung des aFMF ab. Hierzu zählen die Anzahl der Aktoren und der funktionalen Freiheitsgrade, die der Entwickler (manuell) in der Entwicklungsphase festlegt.

### 6.1.1 Festlegung der funktionalen Freiheitsgrade

Der Entwickler legt die funktionalen Freiheitsgrade in Abhängigkeit der Komplexität der Schnittstellen der LO fest. Je mehr funktionale Freiheitsgrade (feingranularer) ein aFMF besitzt, desto flexibler lässt es sich in ein aMFS integrieren und optimieren. Auf der anderen Seite steigen die Kombinationsmöglichkeiten zwischen den LO und dadurch sinkt die Robustheit. In Abbildung 6-3 sind am Beispiel einer H-Kreuzung die unterschiedlichen Möglichkeiten der Modellierung in einem aMFS gezeigt. In der Abbildung links ist eine H-Kreuzung durch ein aFMF repräsentiert. Falls jede Komponente (Rollenförderer und Riemenausschieber) über einen eigenen Aktor verfügt, ist eine einzelne Komponente in der Lage eigenständig einen Transport auszuführen. Für diese feinste Granularitätsstufe der Modellierung wird die Fähigkeit jeder Komponente mit jeweils einer eigenen LO beschrieben.

Im Gegensatz dazu sind in der Abbildung 6-3 Mitte die Fähigkeiten der H-Kreuzung mit nur einer LO beschrieben. Diese grobe Granularität der Modellierung bietet sich beispielsweise an, wenn das Zusammenspiel zwischen dem Riemenausschieber und

den Rollenförderern eine komplexe Koordination erfordert. Schleust der Riemenausschieber dynamisch TE vertikal aus, also während die TE über die Rollenförderer in horizontaler Richtung bewegt wird, ist das Timing zum Anheben des Riemenausschiebers entscheidend für eine erfolgreiche Ausschleusung. Hierfür ist es erforderlich, die TE auf eine definierte Geschwindigkeit zu beschleunigen und diese konstant zu halten. Sind an diesem Prozess mehrere LO beteiligt, ist eine komplexe Koordination zwischen den LO notwendig und das Risiko für Fehler steigt. Daher besteht die Möglichkeit, die funktionalen Freiheitsgrade einzuschränken, um die Robustheit zu erhöhen. Allerdings können Transporte nur mit grober Granularität koordiniert und optimiert werden, da der Status und die Position einer TE innerhalb einer LO unbekannt sind. Das Prinzip die funktionalen Freiheitsgrade einzuschränken kann nicht nur auf Schnittstellen angewendet werden, sondern auch auf Zusatzfunktionen, wie z. B. dem Etikettieren während eines Transports.

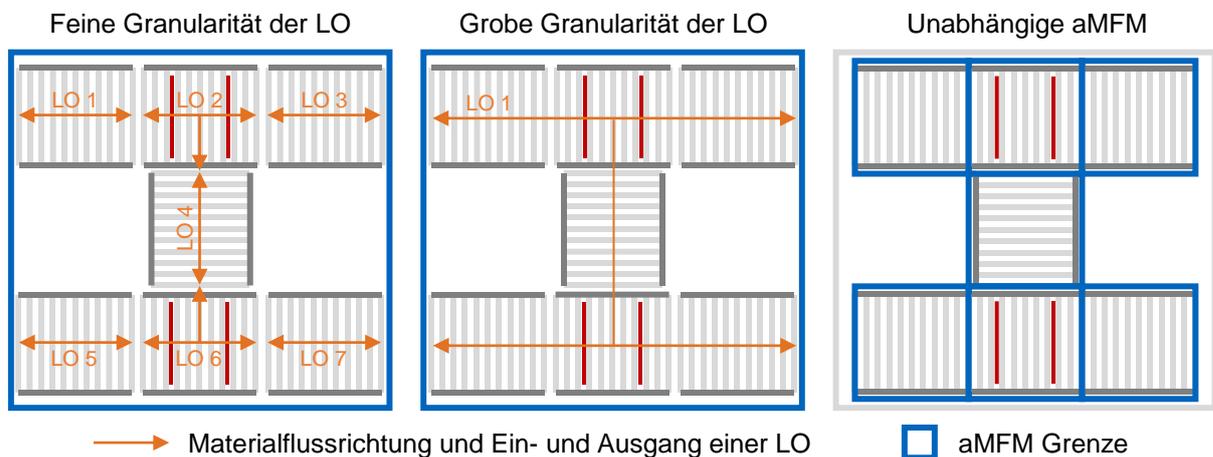


Abbildung 6-3: Modellierung einer H-Kreuzung mit unterschiedlichen Granularitäten.

Eine weitere Möglichkeit der Modellierung ist in der Abbildung 6-3 rechts dargestellt, in der jede Komponente als eigenes aMFM abgebildet ist. Die aMFM sind in der Folge sehr einfach aufgebaut, was die interne Koordination der LO vereinfacht, aber jedes aMFM muss mit einer eigenen Steuerungshardware ausgestattet werden. Auch bei einzelnen aMFM gilt, dass komplexe Schnittstellen zwischen den aMFM die Robustheit reduzieren. Zusätzlich kann keine individuelle Strategie angewendet werden, um den Materialfluss im Bereich der H-Kreuzung zu koordinieren. Die Koordination des Materialflusses erfolgt durch die globale Materialflusssteuerung, die für diesen Bereich die allgemeinen aMFS Strategien anwendet. Die flexible Gestaltung der aMFM und manuelle Festlegung der funktionalen Freiheitsgrade ermöglicht es, komplexe Schnittstellen und Funktionen zwischen Komponenten in einer LO mit einfachen Schnittstel-

len zu kapseln und dem aFMF als Blackbox zur Verfügung zu stellen. Hierdurch müssen zwischen zwei aFMF im aMFS nur noch einfache Schnittstellen automatisch konfiguriert und koordiniert werden, wodurch ein hoher Grad an Robustheit erreicht wird.

Nachdem der Entwickler die Grenze des aFMF und die Granularität der LO festgelegt hat, erfolgt im nächsten Schritt die Implementierung der LO. Hierfür definiert der Entwickler zunächst Arbeitsräume. In den Arbeitsräumen findet die Ausführung der LO statt. Ein Arbeitsraum ist durch einen manuell, einmalig festgelegten und nicht veränderbaren Raum im internen Koordinatensystem des aFMF definiert. Für das Anlegen eines Arbeitsraums gelten folgende Gestaltungsrichtlinien:

1. Der Arbeitsraum ist im internen Koordinatensystem des aFMF beschrieben.
2. Arbeitsräume dürfen sich nicht überschneiden.
3. Ein Arbeitsraum muss mindestens eine TE aufnehmen.
4. Ein Arbeitsraum kann mehreren LO zugewiesen werden.
5. Ein Arbeitsraum besitzt exklusiven Zugriff auf die Komponenten (Aktoren, Sensoren, etc.) in seinem Einflussbereich (Raum).

Die Gestaltungsrichtlinien stellen sicher, dass während der Inbetriebnahme eine flexible Kombination von LO und im operativen Betrieb eine einheitliche Koordination der Ausführung der LO möglich ist. Unabhängig von der Gestaltung eines aFMF und des aMFS Layouts vermeidet die einheitliche Koordination in der Folge Blockaden. Die Gestaltungsrichtlinien werden im weiteren Verlauf der Arbeit verifiziert. Für die T-Kreuzung ergeben sich zwei Arbeitsräume, die jeweils ein Förderband umfassen, wie in Abbildung 6-4 links eingezeichnet. Der Actor für den Ausschieber ist Arbeitsraum AR1 zugeordnet, da sich eine TE beim Ausschleusen gleichzeitig im Einflussbereich des Aktors von Förderband 1 und des Ausschleusers befindet.

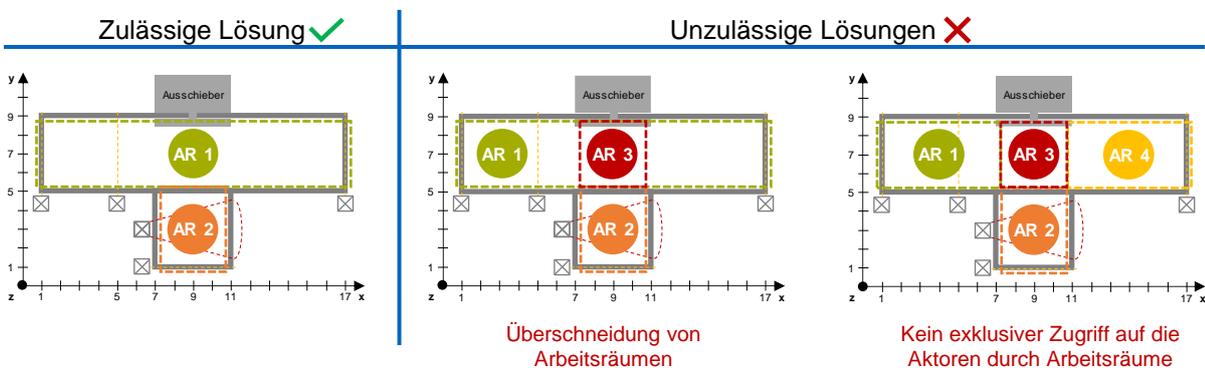


Abbildung 6-4: Beispiele von zulässigen und unzulässigen Gestaltungen von Arbeitsräumen.

Separate Arbeitsräume für das Förderband 1 und den Ausschleuser verstoßen gegen die 2. Gestaltungsrichtlinie, wie in der Mitte gezeigt. Die Unterteilung des Bereichs von Förderband 1 in mehrere Arbeitsräume verstößt gegen die 5. Gestaltungsrichtlinie, da mehrere Arbeitsräume auf den Motor des Förderbands zugreifen, wie rechts gezeigt.

### 6.1.2 Beschreibung der LO

Nach der Festlegung der Arbeitsräume eines aMFM, implementiert der Entwickler die LO. Eine LO ist durch folgende Eigenschaften beschrieben:

1. Eindeutiger Name innerhalb eines aMFM
2. Arbeitsräume in denen die LO ausgeführt wird
3. Eintrittspunkt in die LO im Koordinatensystem des aMFM
4. Austrittspunkt aus der LO im Koordinatensystem des aMFM
5. Ausführbare Zusatzfunktionen
6. Zulässige Typen an TE
7. Programm
8. Ausführungszeit

Der Name einer LO dient der Unterscheidung der verschiedenen LO, wie in Tabelle 6-1 für das Beispiel der T-Kreuzung gezeigt. Einer LO ist mindestens ein Arbeitsraum zugewiesen, in der sich eine TE während der Ausführung befindet. Transportiert eine LO beispielsweise eine TE von einem Arbeitsraum in einen anderen, werden beide Arbeitsräume eingetragen, da sich während der Übergabe die TE gleichzeitig in zwei Arbeitsräumen befindet. In der Tabelle sind für die LO *Pushing* daher Arbeitsraum *AR1* und *AR2* vermerkt.

Tabelle 6-1: LO-Liste für das Beispiel T-Kreuzung.

| Name    | Arbeitsraum | Eintrittspunkt (E)                            | Austrittspunkt (A)   | Zusatzfunktion | TE-Typ | Programm | Ausführungszeit   |  |    |    |       |    |       |
|---------|-------------|---|--|----------------|--------|----------|---|--|----|----|-------|----|-------|
| Conv1.1 | 1           | $\begin{pmatrix} 1+ \\ 7 \\ 0 \end{pmatrix}$  | $\begin{pmatrix} 5 \\ 7 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 17- \\ 7 \\ 0 \end{pmatrix}$ |                | KLT1   | Con1     | <table border="1"><tr><td></td><td>E1</td></tr><tr><td>A1</td><td>2,35s</td></tr><tr><td>A2</td><td>8,00s</td></tr></table> |  | E1 | A1 | 2,35s | A2 | 8,00s |
|         | E1          |   |  |                |        |          |   |  |    |    |       |    |       |
| A1      | 2,35s       |   |  |                |        |          |   |  |    |    |       |    |       |
| A2      | 8,00s       |   |  |                |        |          |   |  |    |    |       |    |       |
| Conv1.2 | 1           | $\begin{pmatrix} 17- \\ 7 \\ 0 \end{pmatrix}$ | $\begin{pmatrix} 5 \\ 7 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 1+ \\ 7 \\ 0 \end{pmatrix}$  |                | KLT1   | Con1     | <table border="1"><tr><td></td><td>E1</td></tr><tr><td>A1</td><td>5,65s</td></tr><tr><td>A2</td><td>8,00s</td></tr></table> |  | E1 | A1 | 5,65s | A2 | 8,00s |
|         | E1          |   |  |                |        |          |   |  |    |    |       |    |       |
| A1      | 5,65s       |   |  |                |        |          |   |  |    |    |       |    |       |
| A2      | 8,00s       |   |  |                |        |          |   |  |    |    |       |    |       |
| Conv2   | 2           | $\begin{pmatrix} 9 \\ 5- \\ 0 \end{pmatrix}$  | $\begin{pmatrix} 9 \\ 1+ \\ 0 \end{pmatrix}$   |                | KLT1   | Con2     | <table border="1"><tr><td></td><td>E1</td></tr><tr><td>A1</td><td>4,00s</td></tr></table>                                   |  | E1 | A1 | 4,00s |    |       |
|         | E1          |   |  |                |        |          |   |  |    |    |       |    |       |
| A1      | 4,00s       |   |  |                |        |          |   |  |    |    |       |    |       |
| Push    | 1,2         | $\begin{pmatrix} 5 \\ 7 \\ 0 \end{pmatrix}$   | $\begin{pmatrix} 9 \\ 5- \\ 0 \end{pmatrix}$   |                | KLT1   | Push     | <table border="1"><tr><td></td><td>E1</td></tr><tr><td>A1</td><td>2,88s</td></tr></table>                                   |  | E1 | A1 | 2,88s |    |       |
|         | E1          |   |  |                |        |          |   |  |    |    |       |    |       |
| A1      | 2,88s       |   |  |                |        |          |   |  |    |    |       |    |       |
| Ident   | 2           | $\begin{pmatrix} 9 \\ 5- \\ 0 \end{pmatrix}$  | $\begin{pmatrix} 9 \\ 1+ \\ 0 \end{pmatrix}$   | ID_Barcode     | KLT1   | Ident    | <table border="1"><tr><td></td><td>E1</td></tr><tr><td>A1</td><td>4,00s</td></tr></table>                                   |  | E1 | A1 | 4,00s |    |       |
|         | E1          |   |  |                |        |          |   |  |    |    |       |    |       |
| A1      | 4,00s       |   |  |                |        |          |   |  |    |    |       |    |       |

Der Eintrittspunkt beschreibt an welchen Stellen die Übergabe einer TE an eine LO möglich ist. Die Beschreibung erfolgt im dreidimensionalen Koordinatensystem des aMFM bezogen auf den geometrischen Schwerpunkt einer TE. Durch die Eintrittspunkte wird festgelegt, dass die Übergabe einer TE zwischen zwei LO nur an definierten Punkten ausgeführt werden darf. Im Falle eines Rollenförderers müssen die Punkte z. B. mit einer Lichtschranke ausgestattet sein. Die Austrittspunkte beschreiben analog die Stellen, an denen eine TE aus einer LO austreten kann.

Neben der Beschreibung der Ein- und Austrittspunkte (Übergabepunkte) ist zusätzlich noch die Ausrichtung der TE am Übergabepunkt relevant. Hierdurch wird am Übergabepunkt eine definierte Übergabe an die nächste LO sichergestellt. Die mögliche Ausrichtung hängt von der vorhandenen Sensorik ab. Einige Sensoren, wie z. B. Lichtschranken, sind zunächst nur in der Lage den Beginn oder das Ende einer TE zu detektieren, aber nicht deren Mittelpunkt. Wenn die Länge einer TE bekannt ist, das Fördermittel mit konstanter Geschwindigkeit betrieben werden kann und die TE mit geringer Latenz gestoppt werden kann, ist zusätzlich eine mittige Positionierung auch über Lichtschranken erreichbar. Den gleichen Effekt erreicht z. B. auch ein Motor mit integriertem Schrittzähler. Folglich hängt die Ausrichtung einer TE sowohl von der Sensorik als auch vom hinterlegten Programm in der Steuerung ab. In Abbildung 6-5 sind für die verschiedenen Lichtschranken jeweils die im Programm hinterlegten Ausrichtungen dargestellt. Bei den Lichtschranken am Rand des aMFM werden die TE gestoppt, sobald die Lichtschranke auslöst. Hierdurch wird ein Herausfallen der TE aus dem aMFM oder eine ungewollte Übergabe an das benachbarte aMFM vermieden. Die mittlere Lichtschranke auf Förderband 1 ist in der Lage, die TE mittig auszurichten.

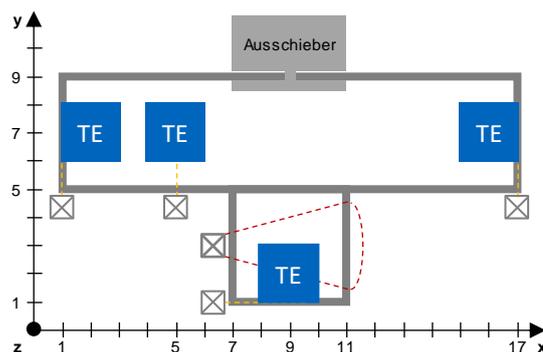


Abbildung 6-5: Im Programm hinterlegte Positionen der TE auf der T-Kreuzung.

Die Übergabepunkte am Rand des aMFM hängen von den Abmaßen (Länge) der TE ab. Ein aMFM kann für verschiedene Typen an TE verwendet werden, somit ergeben sich verschiedene Übergabepunkte. Um die Beschreibung der Übergabepunkte zu vereinfachen, werden die Koordinaten folgendermaßen ergänzt:

- „+“: TE steht in positiver Koordinatenrichtung neben dem Übergabepunkt
- „-“: TE steht in negativer Koordinatenrichtung neben dem Übergabepunkt
- Keine Ergänzung: TE steht mit geometrischem Schwerpunkt auf dem Übergabepunkt

Der Entwickler kann für LO mehrere Ein- und Austrittspunkte hinterlegen. Bei der Definition mehrerer Ein- und Austrittspunkte muss sichergestellt werden, dass von jedem Eintrittspunkt auch jeder Austrittspunkt erreicht werden kann. Dies ist insbesondere bei unidirektionalen Fördermitteln relevant. Falls nicht jeder Austrittspunkt von jedem Eintrittspunkt erreicht werden kann, können mehrere LO mit der gleichen Funktion aber unterschiedlichen Ein- und Austrittspunkten definiert werden.

Neben der Fähigkeit eine TE zu transportieren oder bereitzustellen, sind LO auch in der Lage eine Zusatzfunktion durchzuführen. Ist eine LO in der Lage eine Zusatzfunktion anzubieten, wird dies in den Eigenschaften vermerkt. Dafür müssen die geforderten Zusatzfunktionen im Prozessablauf einer TE und die angebotenen Zusatzfunktionen einer LO einheitlich beschrieben werden, um eine passende Paarung von Anforderungen der TE und Angeboten der LO zu identifizieren. Die Zusatzfunktion „Identifikation“ ist ein standardmäßiger Bestandteil eines aMFS und wird nach eigenem Ermessen des aMFS in den Prozessablauf einer TE integriert. Hierfür muss in der Beschreibung der TE hinterlegt werden, welche Art der Identifikation wie z. B. Barcode oder RFID möglich ist. Eine LO ist möglicherweise nicht für alle Typen an TE geeignet, die in einem aMFS transportiert werden. TE sind beispielsweise aufgrund ihres Gewichtes oder Abmessungen nicht für eine LO geeignet. Daher kann für eine LO eingeschränkt werden, welche Typen an TE zulässig sind wie z. B. Kleinladungsträger.

Eine LO besitzt eine Verknüpfung zum Programmcode. Im Programmcode ist die Ansteuerung der Aktoren und Sensoren definiert, um eine LO physisch auszuführen. Der Programmcode wird manuell für jede LO erstellt und in der operativen Betriebsphase nach Bedarf ausgeführt. Im weiteren Verlauf der Arbeit werden Beispiele für die Gestaltung eines solchen Programmcodes für verschiedene Typen an aMFM und LO gezeigt. Der letzte Parameter ist die Ausführungszeit, in dem für jede Kombination an Ein- (E) und Austrittspunkten (A) jeweils die Zeit für die Ausführung des Programms eingetragen wird. In Tabelle 6-1 ist für das Beispiel der T-Kreuzung eine mögliche Beschreibung der LO gezeigt.

Die LO repräsentieren die logistischen Fähigkeiten eines aMFM, die in den nachfolgenden Phasen nach Bedarf kombiniert und ausgeführt werden können. Somit ist An-

forderung AK1, ein aFMF in verschiedenen aMFS Layouts wiederzuverwenden, erfüllt. LO erfüllen zusätzlich Anforderung AK9, allgemeine logistische Operationen während der Entwicklungsphase zu implementieren.

### 6.1.3 Beschreibung der logistischen Übergabeoperationen

Neben den LO werden zusätzlich die logistischen Übergabeoperationen benötigt, um einen Transport durch ein aFMF auszuführen. Die Übergabeoperationen beschreiben das Vorgehen, um eine externe Übergabe zwischen zwei aFMF auszuführen. Auch hier gilt es robuste Übergabeoperationen zu definieren, die über ausreichend Flexibilität verfügen, um verschiedene aFMF miteinander zu kombinieren.

#### Identifikation der Übergabearten und Typen an Materialfluss-Schnittstellen

Der Bedarf und die Anforderungen an Übergabeoperationen wurden auf Basis der am Markt verfügbaren Fördermittel ermittelt. Zu diesem Zweck wurde zunächst ein Marktüberblick ausgewertet, der das Produktsortiment im Bereich automatisierter Förder-technik zusammenfasst [Mat-2014, S. 40ff.]. Die identifizierten Fördermittel wurden dann in einer Matrix miteinander kombiniert und die Art der Übergabe bestimmt. Ein Auszug der Analyse ist in Tabelle 6-2 gezeigt und die vollständige Analyse in Tabelle A-1.

Tabelle 6-2: Auszug aus der Zuordnung der Übergabearten Fördern (F), Schieben / Ziehen (S), Gleiten (G), Legen / Nehmen (L), Fallen (Fa) und keine Übergabe möglich (X) zu den verschiedenen Fördermittelkombinationen.

| Fördermittel       |            | Bandförderer | Gepäckförderanlage | Hängeförderer | Kippschalensorter | Quergurtsorter | Kettenförderer | Rollenförderer |
|--------------------|------------|--------------|--------------------|---------------|-------------------|----------------|----------------|----------------|
|                    |            | Bandförderer | F                  | F             | F,S,Fa            | S,Fa           | F              | F              |
| Gepäckförderanlage | F          | F            | F,S,Fa             | S,Fa          | F                 | F              | F              |                |
| Hängeförderer      | F,L,Fa,G   | F,L,Fa,G     | F                  | F,L,Fa,G      | F,L               | F,L            | F,L            |                |
| Kippschalensorter  | G,Fa       | G,Fa         | G,Fa               | G,Fa          | G                 | X              | X              |                |
| Quergurtsorter     | F,S,Fa     | F,S,Fa       | F,S,Fa             | S,Fa          | F,S               | F              | F              |                |
| Kettenförderer     | F          | F            | F                  | S,Fa          | F                 | F              | F              |                |
| Rollenförderer     | F          | F            | F                  | S,Fa          | F                 | F              | F              |                |
| Riemenförderer     | F          | F            | F                  | S,Fa          | F                 | F              | F              |                |
| Riemenüberschieber | F,S        | F,S          | F,S                | S,Fa          | F                 | F              | F,S            |                |
| Ausschieber        | F,S        | F,S          | F,S                | S,Fa          | F                 | F              | F,S            |                |
| Rutsche            | G,Fa       | G,Fa         | G,Fa               | G,Fa          | G                 | X              | X              |                |
| Kugelbahn          | F          | F            | F,S,Fa             | S,Fa          | F                 | F              | F              |                |
| Einschienebahn     | F,S,G,Fa   | F,S,G,Fa     | F,S,G,Fa           | F,S,G,Fa      | F                 | F              | F,S            |                |
| Elektrohängebahn   | F,S,G,L,Fa | F,S,G,L,Fa   | F,S,G,Fa           | F,S,G,L,Fa    | F,L               | F,L            | F,S,G,L        |                |
| Elektroschiebebahn | F          | F            | F,S,G              | F,S,G,Fa      | F                 | F              | F,G            |                |

Folgende Übergabearten wurden identifiziert und definiert:

- **Fördern:** Sender und Empfänger-aMFM fördern eine TE synchron entlang einer gemeinsamen Richtung. Das Fördern erfolgt mit oder ohne Schlupf. Die Übergabe tritt z. B. zwischen zwei benachbarten Bandförderern auf.
- **Schieben / Ziehen:** Das Sender- oder Empfänger-aMFM fördert aktiv die TE. Schieben / Ziehen erfolgt mit Schlupf, da sich bei mindestens einem aMFM die Geschwindigkeit der TE und des Fördermittels unterscheiden. Die Übergabe tritt z. B. bei einem Ausschieber auf, der eine TE auf einem Rollenförderer senkrecht zur Förderrichtung auf ein benachbartes Rollenförderer-aMFM aus-schleust.
- **Gleiten:** Die TE wird ohne mechanischen Antrieb aufgrund einer kinetischen und / oder potenziellen Energie gefördert. Die Schwerkraft beschleunigt die TE, wenn sie sich auf einer schiefen Ebene befindet und die Haftreibung überwunden wurde. Die Übergabe tritt z. B. von einem Kippschalensorter zu einem Förderband auf.
- **Legen / Nehmen:** Das Sender-aMFM legt eine TE auf eine oder das Empfänger-aMFM nimmt eine TE von einem Übergabepunkt. Die Übergabe tritt z. B. zwischen einem Bandförderer und einem Greifer auf.
- **Fallen:** Die TE fällt ohne Kontrolle beziehungsweise Führung auf eine Fläche und verändert dabei ihre potenzielle Energie. Die Übergabe tritt z. B. von einem Kippschalensorter zu einem Auffangbehälter auf.

Zu einer Übergabeart gehören jeweils zwei Materialflussschnittstellen, eine für das abgebende und eine für das annehmende aMFM (vgl. Abbildung 6-6). Auf Basis der identifizierten Übergabearten wurden verschiedene Typen an Materialflussschnittstellen definiert. Eine Materialflussschnittstelle beschreibt die Fähigkeiten, die ein aMFM für die Übergabe einer TE bereitstellt. Durch Clustern der Fähigkeiten werden verschiedene Typen an Materialflussschnittstellen gebildet, die gleiche Parameter aufweisen, aber sich in den Werten unterscheiden können.



Abbildung 6-6: Zusammenhang zwischen Übergabeart und Materialflussschnittstellen.

Aus Tabelle 6-2 erfolgt die Ableitung von verschiedenen Typen an Materialflussschnittstellen, um die auftretenden Übergabearten abzudecken. Folgende Typen an Materialflussschnittstellen wurden für die Abgabe und Annahme einer TE identifiziert und definiert:

- **Fördern:** Die TE liegt auf einer angetriebenen Oberfläche und wird in eine definierte Richtung bei der Annahme oder Abgabe bewegt. Parameter sind z. B. der Geschwindigkeitsbereich, in dem ein Rollenförderer betrieben werden darf.
- **Gleiten:** Die TE gleitet über eine Oberfläche mit Schlupf in eine definierte Richtung. Parameter sind z. B. der Reibungskoeffizient der Oberfläche für verschiedene Materialien der Auflagefläche.
- **Schieben:** Die TE liegt auf einer Oberfläche und wird mechanisch geschoben. Parameter sind z. B. die Größe der Kontaktfläche mit einem Ausschieber.
- **Fläche Oben:** Die TE liegt auf einer Oberfläche und wird ohne Schlupf angenommen oder abgegeben. Parameter sind z. B. die Größe der Oberfläche oder Dämpfung.
- **Fläche Seite:** Die TE liegt auf einer Oberfläche und wird mit Schlupf angenommen oder abgegeben. Parameter sind z. B. die Größe der Oberfläche oder Reibungskoeffizient.
- **Legen:** Die TE wird durch den Raum transportiert und auf eine definierte Position kontrolliert abgelegt.
- **Nehmen:** Die TE wird von einer definierten Position kontrolliert aufgenommen und durch den Raum transportiert.
- **Werfen:** Die TE wird gestoßen oder fallen gelassen und ohne Führung durch den Raum bewegt. Parameter sind z. B. der Impuls und der Bereich des Bewegungsvektors.

In Tabelle 6-3 sind jeweils links für ein Fördermittel alle Übergabearten konsolidiert, die auf Basis von Tabelle 6-2 mit anderen Fördermitteln auftreten und rechts die auftretenden Materialflussschnittstellen. Die vollständige Tabelle ist in Tabelle A-2 gezeigt.

Tabelle 6-3: Identifikation der Materialflussschnittstellen auf Basis der Übergabearten eines Fördermittels.

| Fördermittel |                    | Übergabeart<br>(Annahme oder Abgabe einer TE) | Materialflussschnittstelle |         |          |             |              |       |        |        |
|--------------|--------------------|---|----------------------------|---------|----------|-------------|--------------|-------|--------|--------|
|              |                    |   | Fördern                    | Gleiten | Schieben | Fläche Oben | Fläche Seite | Legen | Nehmen | Fallen |
| Förderer     | Bandförderer       | F,S,L,Fa                                      | x                          | x       | x        | x           | x            |       |        | x      |
|              | Gepäckförderanlage | F,S,L,Fa                                      | x                          | x       | x        | x           | x            |       |        | x      |
|              | Hängeförderer      | F,S,G,L,Fa                                    | x                          | x       | x        |             |              | x     | x      |        |
|              | Kippschalensorter  | G,Fa  |                            | x       |          | x           |              |       |        | x      |
|              | Quergurtsorter     | F,S,Fa  | x                          |         | x        |             |              |       |        |        |
|              | Kettenförderer     | F,S,L   | x                          |         | x        | x           |              |       |        |        |

Für die Ermittlung des theoretischen Spektrums an Übergabearten sind in Tabelle 6-4 die Materialflussschnittstellen in einer Matrix angeordnet und jeweils die Übergabeart

zugeordnet. Auf Basis der Matrix ergeben sich weitere Übergabearten. In einigen Fällen ergibt sich eine dynamische Variante der Übergabeart, wenn sowohl das Empfänger- als auch das Sender-aMFM eine TE aktiv bewegen. Dynamische Varianten treten in der Praxis selten auf, da sie eine Koordination oder sogar Regelung zwischen den beteiligten aMFM erfordern. Durch die zusätzliche Komplexität steigt wiederum die Wahrscheinlichkeit für Fehlfunktion, weshalb in der Praxis diese Varianten eine untergeordnete Bedeutung haben.

Tabelle 6-4: Kombination der Materialflussschnittstellen in einer Matrix und Zuordnung der Übergabeart.

|                                   |                 | Empfänger-Materialflussschnittstelle |                   |          |                  |                   |       |                            |                  |
|-----------------------------------|-----------------|--------------------------------------|-------------------|----------|------------------|-------------------|-------|----------------------------|------------------|
|                                   |                 | Fördern                              | Gleiten           | Schieben | Fläche<br>Oben   | Fläche<br>Seite   | Legen | Nehmen                     | Fallen           |
| Sender-Materialflussschnittstelle | Fördern         | Fördern                              | Schieben / Ziehen |          | Fallen           | Schieben / Ziehen |       | Dynamisch<br>Nehmen        | Fallen Rand      |
|                                   | Gleiten         |                                      | Gleiten           |          | Fallen           | Schieben / Ziehen |       | Dynamisch<br>Nehmen        | Fallen Rand      |
|                                   | Schieben        | Fördern                              | Schieben / Ziehen |          | Fallen           | Schieben / Ziehen |       | Dynamisch<br>Nehmen        | Fallen Rand      |
|                                   | Fläche<br>Oben  |                                      |                   |          |                  |                   |       | Nehmen                     |                  |
|                                   | Fläche<br>Seite |                                      |                   |          |                  |                   |       |                            |                  |
|                                   | Legen           | Dynamisch<br>Legen                   | Legen             |          | Legen            |                   |       | Dynamisch<br>Kollaborieren | Fallen<br>Fläche |
|                                   | Nehmen          |                                      |                   |          |                  |                   |       |                            |                  |
|                                   | Fallen          | Fallen<br>Fläche                     | Fallen<br>Fläche  |          | Fallen<br>Fläche |                   |       |                            | Fallen<br>Fläche |

Der Entwickler legt die Anzahl sowie den Typ der Materialflussschnittstellen fest und definiert die Eigenschaften. In Abhängigkeit des Typs einer Materialflussschnittstelle umfasst die Beschreibung unterschiedliche Eigenschaften, die in der Wissensbasis hinterlegt sind. Die Zusammenstellung der Materialflussschnittstellen als auch der Übergabearten stellt keine abschließende Übersicht dar. Es existieren zum einen noch aMFM für Nischenanwendungen und zum anderen findet eine Weiterentwicklung der aMFM statt, wodurch sich zusätzliche Materialflussschnittstellen und Übergabearten ergeben. Das Anlegen von neuen Materialflussschnittstellen und Übergabearten erfolgt analog zu dem in dieser Arbeit vorgestellten Vorgehen. Die Implementierung neuer oder geänderte Materialflussschnittstellen und Übergabearten in einem bestehenden aMFS erfolgt beispielsweise durch Aktualisierung der aMFM-Steuerung. Hierbei ist auf die Kompatibilität von geänderten Materialflussschnittstellen und Übergabearten zwischen zwei benachbarten aMFM zu achten. Neue Materialflussschnittstellen

und Übergabearten verursachen hingegen keine Kompatibilitätskonflikte, da sie für eine Nutzung auf beiden aMFM implementiert sein müssen und die aMFM sie ansonsten nicht für die Konfiguration berücksichtigen.

### 6.1.4 Beschreibung der Referenzposition und des Interaktionsdurchmessers

Ein aMFM verfügt über eine Referenzposition, die im internen aMFM-Koordinatensystem manuell definiert ist. Die Referenzposition soll im Mittelpunkt des Interaktionsdurchmessers für Materialflussschnittstellen zu benachbarten aMFM liegen. Der Interaktionsdurchmesser bezeichnet den Bereich, der sich mit dem gleichen Bereich des benachbarten aMFM überschneiden muss, damit das benachbarte aMFM für die Einrichtung einer potenziellen Materialflussschnittstelle in Betracht gezogen werden kann. Der Interaktionsdurchmesser dient somit einer ersten Identifikation benachbarter aMFM, mit denen potenziell interagiert werden kann. In Abbildung 6-7 links liegt die Referenzposition im geometrischen Mittelpunkt des Kreuzungs-aMFM und der Interaktionsdurchmesser umschließt alle potenziellen vordefinierten Materialflussschnittstellen. Wohingegen beim Kreuzungs-aMFM rechts die Referenzposition nicht im geometrischen Mittelpunkt liegt, da am rechten Rand eine Zusatzkomponente angeschlossen ist. Diese kann z. B. eine Maschine zum Aufsetzen eines Deckels auf einen Behälter sein, die über keine Materialflussschnittstelle zu benachbarten aMFM verfügt. Daher umfasst der Interaktionsdurchmesser den rechten Bereich des aMFM nicht, da hier Materialflussschnittstellen zu benachbarten aMFM nicht untersucht werden müssen.

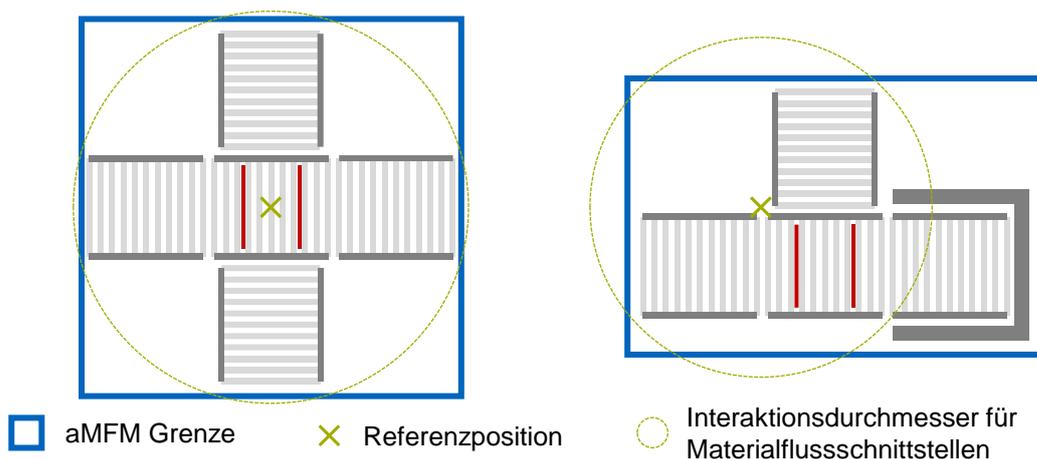


Abbildung 6-7: Darstellung der Interaktionsdurchmesser für Materialflussschnittstellen am Beispiel eines Kreuzungs-aMFM links und eines Kreuzungs-aMFM mit Zusatzkomponente rechts.

## 6.2 Inbetriebnahmephase: Ermittlung der ausführbaren LO und Übergabeoperationen

Die Kombination von LO und Übergabeoperationen ermöglicht die Ausführung eines Transports durch ein aMFM. Die Übergabeoperationen ergeben sich aus der Anzahl, Typ und Position der benachbarten aMFM. Die Übergabeoperationen werden automatisch konfiguriert und ergänzen die LO. Hierfür detektiert das aMFS zunächst ein neues aMFM, richtet die Schnittstellen zu benachbarten aMFM ein und ermittelt die ausführbaren Transporte in Form einer Topologie, wie in Abbildung 6-8 gezeigt. Der Abschnitt basiert unter anderem auf Konzepten aus [fml-2017a; fml-2017b; fml-2018a; fml-2018b]



Abbildung 6-8: Ablauf der Konfiguration eines neuen aMFM.

### 6.2.1 Detektion von neuen aMFM

Wird ein neues aMFM dem aMFS hinzugefügt oder ein bestehendes aMFM entfernt, muss dies detektiert werden, um den Konfigurationsprozess anzustoßen. Die aMFM in einem aMFS sind über ein gemeinsames Kommunikationssystem miteinander verbunden. Das Kommunikationssystem detektiert zuerst Änderungen der angeschlossenen aMFM und teilt dem Koordinator Änderungen als zentrale Verwaltungsinstanz mit. Für die Detektion von Änderungen im Teilnehmerfeld eines aMFS, dessen aMFM durch EtherCAT kommunizieren, entwickelten *Regulin et al.* ein Konzept, das Änderungen während der Laufzeit erkennt [Reg-2015, S. 1198ff.]. Basierend auf diesem Konzept ermittelt ein zentrales Serverwerkzeug eine Liste mit den aktiven Teilnehmern im aMFS und übergibt diese bei Änderungen an den Koordinator [Fis-2017, S. 20]. Somit verfügt der Koordinator über eine Liste aller aktiven Teilnehmer im aMFS und wird über neu hinzugefügte oder entfernte aMFM informiert. Der Koordinator kontaktiert neue aMFM und stößt den Registrierungsprozess an. Dabei wird beispielsweise die ID eines aMFM festgelegt.

### 6.2.2 Lokalisierung von aMFM und Ermittlung der aMFM-Nachbarschaft

Für die Ermittlung der aMFM-Nachbarschaft wird zunächst das neu hinzugefügte aMFM lokalisiert und anschließend die benachbarten aMFM identifiziert.

## Lokalisierungstechnologien

Die Lokalisierung innerhalb von Industriehallen stellt eine große Herausforderung dar. Zum einen können Lokalisierungstechnologien für den Außenbereich wie z. B. GPS innerhalb von Gebäuden nicht verwendet werden [Kjæ-2010, S. 40]. Zum anderen werden funkbasierte Lokalisierungstechnologien innerhalb von Industriehallen durch technische Einrichtungen beeinflusst [Lao-2018, S. 3610]. Dies beeinträchtigt die Reichweite und die Genauigkeit der Lokalisierung in Industriehallen. In einer Marktstudie wurden verschiedene Technologien identifiziert und für jede Technologie verschiedene Lieferanten hinsichtlich Reichweite und Genauigkeit verglichen und in Tabelle 6-5 zusammengefasst [Sak-2017, S. 157ff.] und [fml-2017b].

Tabelle 6-5: *Vergleich von verschiedenen Lokalisierungstechnologien für den Einsatz innerhalb geschlossener Gebäude nach [fml-2017b].*

| Technologie | Toleranz [mm] | Reichweite [m] |
|-------------|---------------|----------------|
| RFID        | 2000          | 100            |
| WLAN        | 5000          | 150            |
| Ultraschall | 30            | 10             |
| UWB         | 200           | 200            |
| Bluetooth   | 1000          | 1              |

aMFS erstrecken sich üblicherweise über eine große Fläche. Daher sind Bluetooth und Ultraschall nicht für die Lokalisierung geeignet, da aufgrund der geringen Reichweite die Installation einer Vielzahl von Antennen notwendig wäre. Die Antennen werden manuell installiert und eingemessen, wodurch eine Erweiterung des aMFS oftmals eine manuelle Erweiterung des Lokalisierungssystems bedingen würde. RFID und WLAN verfügen hingegen über eine ausreichende Reichweite für die Abdeckung einer Industriehalle. Allerdings ist die Ungenauigkeit der Toleranz deutlich größer als viele der verwendeten aMFM. Somit ist es nicht möglich, eine eindeutige Aussage zu treffen, auf welcher Seite beispielsweise ein benachbartes aMFM an ein anderes angeschlossen ist. UWB verfügt über eine ähnliche Reichweite wie RFID und WLAN und ist gleichzeitig deutlich genauer in der Lokalisierung. Im Bereich der Behälterförderung werden auf aMFS oftmals vom Verband der Automobilindustrie (VDA) genormte KLTs eingesetzt mit den Abmaßen 600 mm in der Länge und 400 mm in der Breite. Die aMFM für den Transport solcher KLTs sind daher breiter als 400 mm. Mit einer Lokalisierungsgenauigkeit von 200 mm ist es somit möglich, eindeutig zu unterscheiden an welchem Ende (vorne oder hinten) oder an welchem Anschlusspunkt, der z. B. durch eine seitliche Abzweigung über einen Riemenausschieber realisiert ist, sich ein benachbartes aMFM befindet. In Abbildung 6-9 ist für die gezeigten aMFM der zu bestimmende Referenzpunkt für die Ortung mit dem Durchmesser für die maximale Lokalisierungsabweichung eingezeichnet. Sollte der gemessene Referenzpunkt durch

Ungenauigkeiten bei der Lokalisierung auf dem Durchmesser liegen, ist trotzdem eine eindeutige Zuordnung des aMFM zur richtigen vordefinierten Schnittstelle möglich. Eine Verwechslung der beiden benachbarten aMFM zum falschen Riemenausschieber ist somit ausgeschlossen. UWB ist derzeit die vielversprechendste Technologie für die Lokalisierung von aMFM mit weiterem Potential in der Genauigkeit und Anzahl der Sensoren im System [Mac-2018, S. 588ff.; Dar-2015, S. 1263ff.; Sil-2014, S. 280ff.].

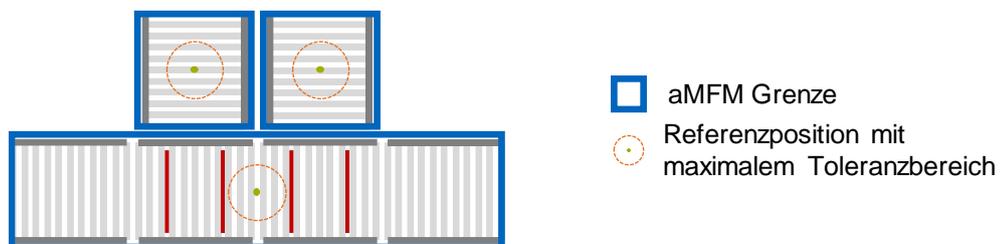


Abbildung 6-9: Referenzposition (grüner Punkt) eines aMFM mit dem maximalen Toleranzbereich (orangener gestrichelter Kreis) der Lokalisierung der Referenzposition.

Die UWB Lokalisierungstechnologie erfüllt nicht die Genauigkeitsanforderungen sämtlicher aMFM. Beispielsweise ist die Lokalisierungstechnologie von UWB für einen Roboter, der TE auf einen beliebigen Punkt stellen kann und nicht auf eine vordefinierte Schnittstelle angewiesen ist, nicht ausreichend. Falls höhere Genauigkeiten gefordert werden, kann z. B. eine weitere Lokalisierungstechnologie mit einer geringeren Reichweite für die Feinpositionierung in die aMFM integriert werden. Eine Alternative stellt die manuelle Lokalisierung eines aMFM und die Eingabe der Messwerte in eine Benutzeroberfläche dar. Die manuelle Lokalisierung stellt für aMFM, die nur mit großem Aufwand neu positioniert werden können und hohe Anforderungen an die Genauigkeit erfordern, die wirtschaftlichste Lösung dar. Neben den ermittelten Positionsinformationen wird ebenfalls die Genauigkeit beziehungsweise maximale Messtoleranz vermerkt, um im weiteren Verlauf der Konfiguration eine Entscheidung über die Verwendung der Positionsdaten zu treffen.

### Durchführung der Lokalisierung

UWB-Systeme bestehen aus Tags, die aktiv Daten versenden und an den zu lokalisierenden Objekten angebracht sind. Der Lokalisierungsbereich ist durch Antennen (Anker) abgedeckt, die die von den Tags gesendeten Daten empfangen. Die Auswertung der empfangenen Daten und Berechnung der Position erfolgt auf einem Lokalisierungsserver, an den die Antennen die empfangenen Daten weiterleiten. Für die automatische Lokalisierung mit UWB werden die aMFM mit zwei Tags und die Halle mit Ankern ausgestattet. Die beiden Tags auf dem aMFM sollten zum einen möglichst weit voneinander entfernt angebracht werden, um die Position und Orientierung eines aMFM im Raum zu bestimmen. Zum anderen sollten die Tags möglichst an der Ober-

fläche eines aMFM positioniert sein, damit sich zwischen Tag und Anker wenig Hindernisse für eine Funkverbindung befinden. Die ID und die Position der Tags im internen Koordinatensystem des aMFM sind in der Wissensbasis des aMFM hinterlegt. Neben den beiden Pflicht-Tags können noch weitere Tags angebracht werden, um Messergebnisse zu plausibilisieren. Die aMFM vergleichen hierfür die gemessene Position der Tags auf dem aMFM mit der in der Wissensbasis hinterlegten theoretischen Position. Sollte sich bei einem Tag eine Abweichung ergeben, wurde die Lokalisierung wahrscheinlich durch eine ungünstige Lage des Tags im aMFS, wie z. B. metallische „Hindernisse“ zwischen Tag und Anker, beeinträchtigt. Die Positionsdaten des Tags sollten daher verworfen werden, wie in Abbildung 6-10 gezeigt.

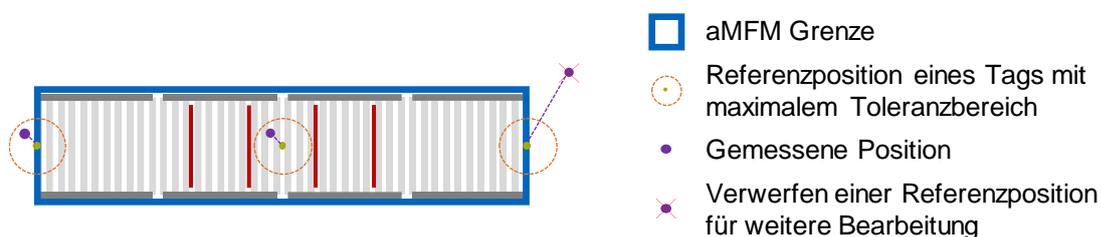


Abbildung 6-10: Plausibilisierung der gemessenen Position mit der eingetragenen Referenzposition und Verwerfung einer Referenzposition für die weitere Bearbeitung der Daten.

Bei den Lokalisierungssystemen handelt es sich um eigenständige Lösungen, die parallel zu aMFS arbeiten und auf eigenen Lokalisierungsservern laufen. Lokalisierungsserver werten die Messdaten der Anker aus und bestimmen IDs und Positionen der Tags. Detektiert ein Lokalisierungsserver neue Tags oder eine Positionsänderung bei bekannten Tags, übergibt der Lokalisierungsserver die betreffenden Tag-IDs, Positionen und Messtoleranzen an das aMFS. Der Koordinator im aMFS dient als Schnittstelle zu externen Systemen und ist daher zentraler Empfänger der Positionsdaten. Der Koordinator verfügt somit über eine Liste an Tag-IDs mit Positionen, die vom Lokalisierungsserver als neu oder geändert identifiziert wurden. Im Fall einer manuellen Lokalisierung verfügt das aMFS über eine Benutzeroberfläche, über die die gemessenen Positionsdaten eingetragen und dem Koordinator übermittelt werden.

### Identifikation der benachbarten aMFM

Im Rahmen des Registrierungsprozesses für neue aMFM werden die Tag-IDs durch den Koordinator abgefragt und mit der Liste der neuen Tag-IDs und geänderten Positionen verglichen. Im Falle einer Übereinstimmung wird die Tag-ID mit Position an das neue aMFM geschickt und in der Liste des Koordinators gelöscht. Bei der Neupositionierung eines bestehenden aMFM muss darauf geachtet werden, dass die Kommunikation getrennt wird. Hierdurch erkennt der Koordinator das umgezogene aMFM als neues aMFM und startet den Konfigurationsvorgang erneut.

Auf Basis der Positionsdaten der Tags und dem Wissen über die Position der Tags im internen Koordinatensystem des aMFM, berechnet das aMFM die absolute Position der aMFM Referenzposition im aMFS und die Genauigkeit in jede Koordinatenrichtung und Orientierung. Anschließend teilt das aMFM dem Koordinator die absoluten Koordinaten der Referenzposition sowie den Radius und die Höhe des Interaktionsdurchmessers mit. Da der Interaktionsdurchmesser durch einen Kreis definiert ist, spielt die Orientierung des aMFM keine Rolle und vereinfacht im Folgenden die Berechnungen des Koordinators. Der Koordinator vergleicht den Interaktionsdurchmesser des neuen aMFM mit den Interaktionsdurchmessern der bestehenden aMFM und identifiziert alle aMFM, deren Interaktionsdurchmesser sich mit dem neuen aMFM überschneiden. Die identifizierten aMFM sind potentielle Nachbarn und werden dem neuen aMFM mitgeteilt.

### 6.2.3 Identifikation der Übergaben zwischen zwei aMFM: Konfiguration der Übergabefunktionen zu benachbarten aMFM

Nachdem ein aMFM Informationen über einen potenziellen Nachbarn vom Koordinator erhält, stößt das aMFM den Konfigurationsprozess für die Übergabe an. Abbildung 6-11 zeigt den Ablauf des Konfigurationsprozesses.

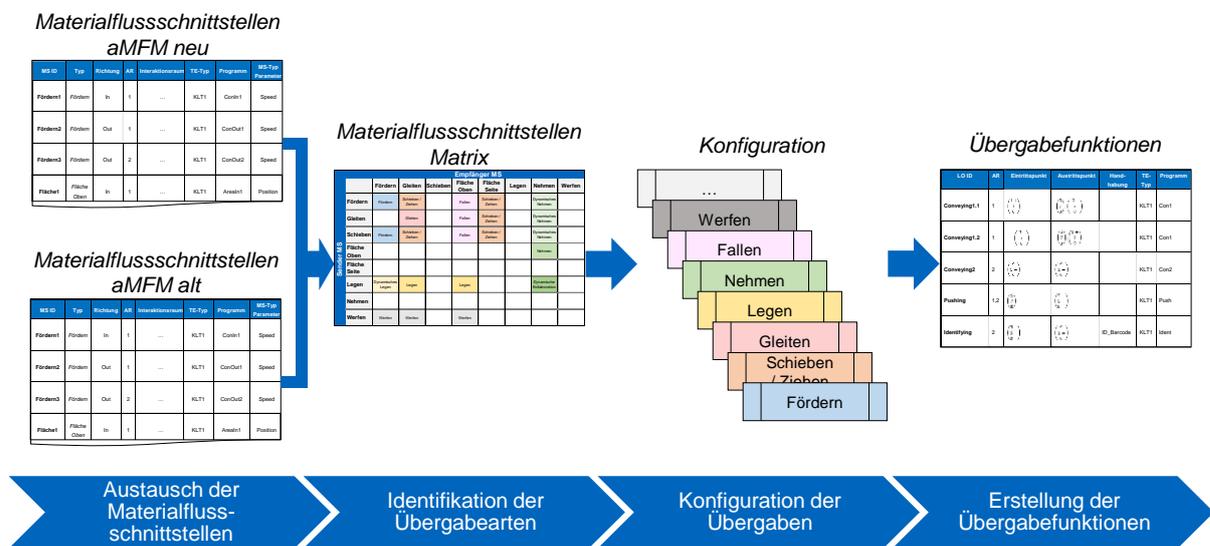


Abbildung 6-11: Vorgehen bei der Konfiguration der Übergaben und Generierung der Übergabefunktionen zwischen zwei benachbarten aMFM.

Zu Beginn fordert das neue aMFM die Liste der Materialflussschnittstellen des potenziell benachbarten aMFM an. Die eigene Liste an Materialflussschnittstellen und die des potenziell benachbarten aMFM werden auf Basis der implementierten Materialflussschnittstellen-Matrix auf konfigurierbare Übergaben hin abgeglichen. Falls sich eine potenzielle Übergabe aus der Matrix ergibt, wird der Konfigurationsprozess hierfür

angestoßen und im Falle einer erfolgreichen Einrichtung eine Übergabefunktion erstellt.

Die Matrix definiert der Entwickler manuell und entscheidet für jede Kombination an Materialflussschnittstellen, ob eine Übergabe zulässig ist. Für jede zulässige Übergabe legt der Entwickler einen Konfigurationsablauf an. Das aMFM richtet in der Inbetriebnahmephase eine Übergabe nach dem vordefinierten Konfigurationsablauf mit einer Übergabefunktion als Ergebnis ein, in der die ausgehandelten Parameter der Übergabe festgehalten sind. Die allgemeinen Schritte eines Konfigurationsablaufs mit dem Ziel der Generierung einer Übergabefunktion und die Evaluation sind in [fml-2018b] beschrieben. Die Definition von Materialflussschnittstellen und die automatische Ermittlung des gemeinsamen *Interaktionsraums* erfüllt Anforderung AK5, Materialflussschnittstellen zu konfigurieren, und AK3, Übergaben an unterschiedlichen Positionen innerhalb eines aMFM zu etablieren.

### 6.2.4 Einrichtung einer Übergabe auf einem aMFM: Konfiguration der Übergabeoperationen

Die zuvor ermittelten Übergabefunktionen definieren die gemeinsam festzulegenden Parameter einer Übergabe. Die Ausführung der Übergabe auf einem aMFM und die Einbindung in die interne Koordination eines aMFM erfolgen an dieser Stelle. Im Folgenden ist der Einrichtungsprozess einer Übergabe auf einem aMFM beschrieben und der Ablauf in Abbildung 6-12 dargestellt.

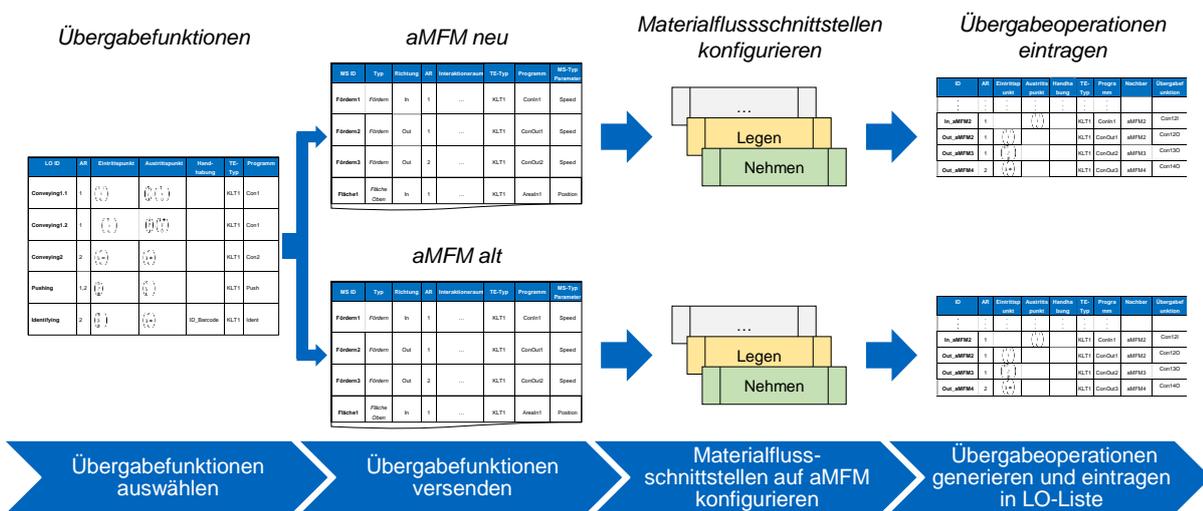


Abbildung 6-12: Vorgehen bei der aMFM internen Konfiguration der Übergabefunktionen.

Falls sich zwischen zwei benachbarten aMFM mehrere Übergabefunktionen ergeben, wählt das aMFM die Übergabefunktion mit der kürzesten Ausführungszeit aus. Weitere Auswahlparameter sind an dieser Stelle z. B. der Energieverbrauch oder Platzbedarf

des gemeinsamen Interaktionsraums. Bis zum Auswahlprozess erfolgt der Konfigurationsprozess auf dem neu hinzugefügten aMFM, um die Berechnungs- und Speicherkapazitäten der bestehenden aMFM nicht zusätzlich zu belasten. Das neu hinzugefügte aMFM übergibt anschließend an jedes benachbarte aMFM genau eine oder keine Übergabefunktion, auf deren Basis eine Übergabe zwischen den beiden aMFM erfolgen soll.

Die Übergabefunktion beschreibt die Eigenschaften der Übergabe. Die Programme der Materialflussschnittstellen greifen auf die Eigenschaften zu, um eine Übergabe mit den zuvor definierten Parametern auszuführen. In manchen Fällen müssen vor der Ausführung einer Schnittstelle mit den konfigurierten Eigenschaften noch weitere Berechnungen durchgeführt werden. Beispielsweise muss ein Roboter seine Trajektorie vor der Ausführung einmalig berechnen. Die Berechnung basiert auf den in der Übergabefunktion festgelegten Parametern wie z. B. dem gemeinsamen Interaktionsraum. Für die Berechnung kann einer Materialflussschnittstelle ein individuelles Konfigurationsprogramm hinterlegt werden. Das aMFM startet das Programm nach Empfang einer neuen Übergabefunktion und ermittelt zusätzliche Parameter, die dann ebenfalls in der Übergabefunktion hinterlegt werden. Die zusätzlichen Parameter sind nur für das aMFM der betroffenen Materialflussschnittstelle relevant und müssen daher nicht an das benachbarte aMFM kommuniziert werden. Ein weiterer Vorteil dieses Vorgehens ist, dass aMFM mit komplexen Übergaben und entsprechend vorhandener Rechenhardware, die zusätzlichen Parameter auf ihrer eigenen Rechenhardware berechnen.

Analog zu LO repräsentieren Übergabeoperationen die Fähigkeiten eines aMFM für eine Übergabe. Die Beschreibung von Übergabeoperationen erfolgt nach dem Muster der LO, um beide Typen im weiteren Verlauf miteinander zu kombinieren und in der LO-Liste zu sammeln. Für das Beispiel der T-Kreuzung, das in Abbildung 6-13 mit benachbarten aMFM dargestellt ist, wird die LO-Liste aus Tabelle 6-1 in Tabelle 6-6 um die Übergabeoperationen ergänzt.

Die Übergabeoperation erhält eine eindeutige ID innerhalb des aMFM und den Arbeitsraum der zu Grunde liegenden Materialflussschnittstelle. Falls die Materialflussschnittstelle eine TE an ein benachbartes aMFM abgibt, wird als Eintrittspunkt der Übergabepunkt der Materialflussschnittstelle übernommen. Im Falle einer Annahme einer TE wird der Übergabepunkt der Materialflussschnittstelle als Austrittspunkt übernommen. Der Eintritts- und Austrittspunkt einer Übergabeoperation gibt an, an welcher Stelle eine TE für eine Übergabe durch die internen LO übernommen oder abgegeben wird. Zusatzfunktionen finden nur innerhalb eines aMFM statt, daher führt eine Übergabeoperation keine Zusatzfunktion aus. Der TE-Typ ergibt sich aus der Übergabefunktion.

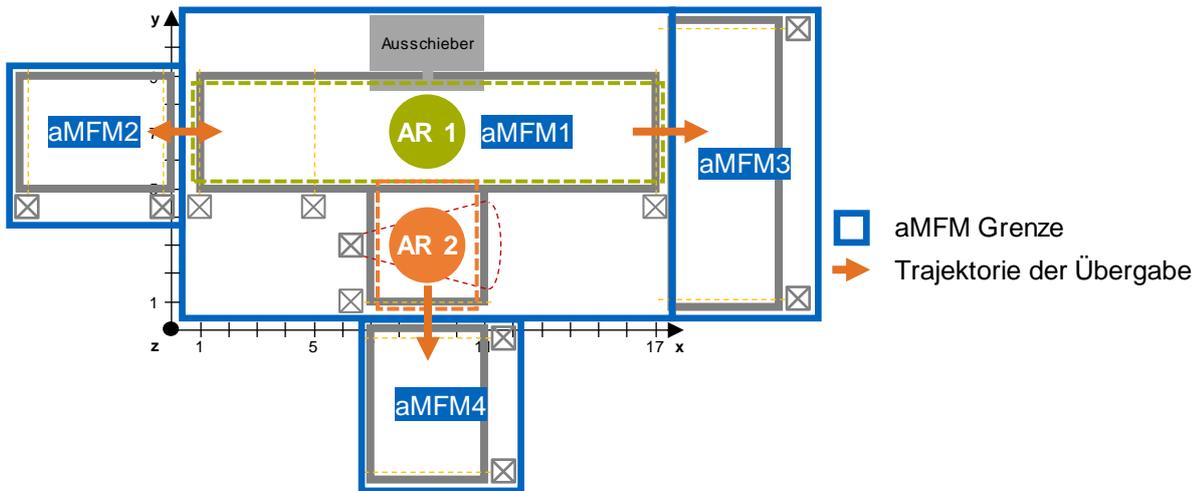


Abbildung 6-13: T-Kreuzung mit benachbarten aMFM.

Tabelle 6-6: Fortführung und Erweiterung der LO-Liste aus Tabelle 6-1 mit den Übergabeoperationen.

| ID  | Arbeitsraum | Eintrittspunkt                                | Austrittspunkt                               | Zusatzfunktion | TE-Typ | Programm | Ausführungszeit   | Nachbar | Übergabefunktion |    |       |       |        |
|-----|-------------|---|--|----------------|--------|----------|---|---------|------------------|----|-------|-------|--------|
| ⋮   | ⋮           | ⋮   |  | ⋮              | ⋮      | ⋮        | ⋮   |         |                  |    |       |       |        |
| I_2 | 1           |   | $\begin{pmatrix} 1+ \\ 7 \\ 0 \end{pmatrix}$ |                | KLT1   | ConIn1   | <table border="1"><tr><td></td><td>E1</td></tr><tr><td>A1</td><td>1,00s</td></tr></table> |         | E1               | A1 | 1,00s | aMFM2 | Con12I |
|     | E1          |   |  |                |        |          |   |         |                  |    |       |       |        |
| A1  | 1,00s       |   |  |                |        |          |   |         |                  |    |       |       |        |
| O_2 | 1           | $\begin{pmatrix} 1+ \\ 7 \\ 0 \end{pmatrix}$  |  |                | KLT1   | ConOut1  | <table border="1"><tr><td></td><td>E1</td></tr><tr><td>A1</td><td>1,00s</td></tr></table> |         | E1               | A1 | 1,00s | aMFM2 | Con12O |
|     | E1          |   |  |                |        |          |   |         |                  |    |       |       |        |
| A1  | 1,00s       |   |  |                |        |          |   |         |                  |    |       |       |        |
| O_3 | 1           | $\begin{pmatrix} 17- \\ 7 \\ 0 \end{pmatrix}$ |  |                | KLT1   | ConOut2  | <table border="1"><tr><td></td><td>E1</td></tr><tr><td>A1</td><td>1,50s</td></tr></table> |         | E1               | A1 | 1,50s | aMFM3 | Con13O |
|     | E1          |   |  |                |        |          |   |         |                  |    |       |       |        |
| A1  | 1,50s       |   |  |                |        |          |   |         |                  |    |       |       |        |
| O_4 | 2           | $\begin{pmatrix} 9 \\ 1+ \\ 0 \end{pmatrix}$  |  |                | KLT1   | ConOut3  | <table border="1"><tr><td></td><td>E1</td></tr><tr><td>A1</td><td>1,00s</td></tr></table> |         | E1               | A1 | 1,00s | aMFM4 | Con14O |
|     | E1          |   |  |                |        |          |   |         |                  |    |       |       |        |
| A1  | 1,00s       |   |  |                |        |          |   |         |                  |    |       |       |        |

Das Programm für die Ausführung einer Übergabe wird von der Materialflussschnittstelle übernommen. In der Übergabefunktion sind die Ausführungsparameter für das Programm hinterlegt, daher muss zusätzlich eine Referenz zur Übergabefunktion erfolgen. Aus diesem Grund wird die LO-Liste um die Angabe der Übergabefunktion erweitert und zusätzlich vermerkt, mit welchem benachbarten aMFM Übergabeoperation stattfindet. Die Einrichtung von Übergabeoperationen in Abhängigkeit der benachbarten aMFM erfüllt die Anforderung AK2, eine variable Anzahl an benachbarten aMFM anzubinden.

### 6.2.5 Ermittlung von logistischen Operationsketten

Nach Ermittlung der Übergabeoperationen kennt ein aMFM seine Fähigkeiten für das aktuelle aMFS, welche in der LO-Liste zusammengefasst sind. Aus den einzelnen Fähigkeiten erstellt das aMFM im nächsten Schritt die Transportangebote und stellt diese der übergeordneten Materialflussebene zur Verfügung. Ein Transportangebot besteht aus einem Eintritts- und Austritts-aMFM sowie optional aus einer logistischen Zusatzfunktion. Die Transportangebote eines aMFM umfassen sämtliche ausführbaren Kombinationen der Eintritts- und Austritts-aMFM mit den logistischen Zusatzfunktionen. Hierfür bildet das aMFM zunächst sämtliche theoretischen Kombinationen, wie in Tabelle 6-7 für das Beispiel der T-Kreuzung gezeigt. Besitzt ein aMFM mehrere logistische Zusatzfunktionen, erfolgt hier ebenfalls eine Kombination der unterschiedlichen Varianten. Das aMFM ist somit in der Lage, entweder eine einzelne oder mehrere logistische Zusatzfunktionen während eines Transports an einer TE durchzuführen.

Tabelle 6-7: Aufstellung des theoretischen Transportangebots mit ausführbaren LO-Ketten.

| Eintritts aMFM | Austritts aMFM | Zusatzfunktion | LO-Kette   | Ausführungszeit |
|----------------|----------------|----------------|--|-----------------|
| aMFM2          | aMFM1          |                | I_2(1+,7,0)  | 1,00s           |
| aMFM2          | aMFM2          |                | I_2(1+,7,0), O_2   | 2,00s           |
| aMFM2          | aMFM3          |                | I_2(1+,7,0), Conv1.1(17-,7,0), O_3                               | 10,00s          |
| aMFM2          | aMFM4          |                | I_2(1+,7,0), Conv1.1(5,7,0), Push(9,5-,0),<br>Conv2(9,1+,0), O_4 | 11,23s          |
| aMFM2          | aMFM1          | ID_Barcode     | -  | -               |
| aMFM2          | aMFM2          | ID_Barcode     | -  | -               |
| aMFM2          | aMFM3          | ID_Barcode     | -  | -               |
| aMFM2          | aMFM4          | ID_Barcode     | I_2(1+,7,0), Conv1.1(5,7,0), Push(9,5-,0),<br>Ident(9,1+,0), O_4 | 11,23s          |
| aMFM1          | aMFM2          |                | O_2  | 2,00s           |
| aMFM1          | aMFM3          |                | Conv1.1(17-,7,0), O_3  | 1,50s           |
| aMFM1          | aMFM4          |                | Conv1.1(5,7,0), Push(9,5-,0), Conv2(9,1+,0),<br>O_4              | 10,23s          |
| aMFM1          | aMFM2          | ID_Barcode     | -  | -               |
| aMFM1          | aMFM3          | ID_Barcode     | -  | -               |
| aMFM1          | aMFM4          | ID_Barcode     | Conv1.1(5,7,0), Push(9,5-,0), Ident(9,1+,0),<br>O_4              | 10,23s          |

Nach der Zusammenstellung der theoretischen Transportangebote ermittelt das aMFM eine ausführbare logistische Operationskette für jedes theoretische Transportangebot. Hierdurch wird Anforderung AK8 erfüllt, flexibel operative Abläufe innerhalb eines aMFM zu erstellen. Ausgangsbasis ist die LO-Liste mit den Eintritts- und Aus-

trittspunkten, die zusammen mit den Ausführungszeiten in eine Adjazenzmatrix überführt wird. Das aMFM spannt mit sämtlichen LO und Übergabeoperationen eine Adjazenzmatrix auf und prüft für jeden Eintrag, ob zwei LO oder Übergabeoperationen über die Austritts- und Eintrittspunkte miteinander verbunden sind. Falls dies der Fall ist, trägt das aMFM die Ausführungszeit aus der LO-Liste in die Adjazenzmatrix ein, die in Tabelle 6-8 beispielhaft aufgestellt ist.

Tabelle 6-8: aMFM interne Adjazenzmatrix der LO und Übergabeoperationen mit Ausführungszeiten.

|          | Conv1.1 | Conv1.2 | Conv2 | Push | Ident | I_2 | O_2 | O_3 | O_4 |
|----------|---------|---------|-------|------|-------|-----|-----|-----|-----|
| Conv1.1  |         | 7       |       |      |       | 3   |     |     |     |
| Conv1.2  | 7       |         |       |      |       |     |     |     |     |
| Conv2    |         |         |       | 5    |       |     |     |     |     |
| Push     | 5       | 5       |       |      |       |     |     |     |     |
| Ident    |         |         |       | 5    |       |     |     |     |     |
| I_2      |         |         |       |      |       |     |     |     |     |
| O_2      |         | 7       |       |      |       | 3   |     |     |     |
| O_3      | 7       |         |       |      |       |     |     |     |     |
| O_4      |         |         | 5     |      | 5     |     |     |     |     |
| Austritt |         |         | 5     |      | 5     |     | 3   | 3   | 3   |

Mit der Adjazenzmatrix und dem Dijkstra-Algorithmus ermittelt das aMFM für jedes theoretische Transportangebot die LO-Kette mit der kürzesten Ausführungszeit. Das aMFM vermerkt in der LO-Kette für jede LO an welchem Austrittspunkt eine TE eine LO verlässt und in die darauffolgende LO eintritt. Existiert keine ausführbare LO-Kette für ein theoretisches Transportangebot, wird dieses gestrichen (vgl. durchgestrichene Transportangebote in Tabelle 6-7).

Die Schnittstelle zwischen der aMFM internen Koordination der Transporte und der übergeordneten Materialflussplanung stellt die lokale Topologie dar. Eine Adjazenzmatrix beschreibt die lokale Topologie, die durch die benachbarten aMFM aufgespannt wird. In den Einträgen wird die theoretische Ausführungszeit vermerkt und welche logistischen Zusatzfunktionen angeboten werden, wie in Tabelle 6-9 gezeigt.

Tabelle 6-9: Adjazenzmatrix der lokalen Topologie für das Beispiel T-Kreuzung.

|       | aMFM1         | aMFM2         | aMFM3 | aMFM4 |
|-------|---------------|---------------|-------|-------|
| aMFM1 |               | 8             |       |       |
| aMFM2 | 3             | 6             |       |       |
| aMFM3 | 10            | 13            |       |       |
| aMFM4 | 13; Ident(13) | 16; Ident(16) |       |       |

Im letzten Schritt der Konfiguration überführt das aMFM Transportangebote mit ausführbaren LO-Ketten in die Liste für freigegebene Transportangebote, auf die das

aMFM während der Laufzeit zugreifen kann. Die Erstellung des theoretischen Modulangebots auf Basis der aMFM-spezifischen LO erfüllt die Anforderung AK4, verschiedene Modultypen zu konfigurieren, Anforderungen AK6, die Funktionalität des aMFM für das aMFS zu ermitteln, und Anforderung AK7, logistische Zusatzfunktionen zu integrieren.

In Abbildung 6-14 ist der Kommunikationsablauf für die Konfiguration eines neuen aMFM zusammengefasst, beginnend von der initialen Bekanntmachung im Kommunikationssystem bis zum Versenden der generierten lokalen Topologie an den Koordinator. Sobald ein aMFM den Selbstkonfigurationsprozess abschließt und sich Änderungen in der Topologie oder den Eigenschaften ergeben, aktualisiert das aMFM seine lokale Topologie und sendet eine Aktualisierung an den Koordinator. Der Koordinator überführt die lokalen Topologien in eine globale Topologie für das gesamte aMFS.

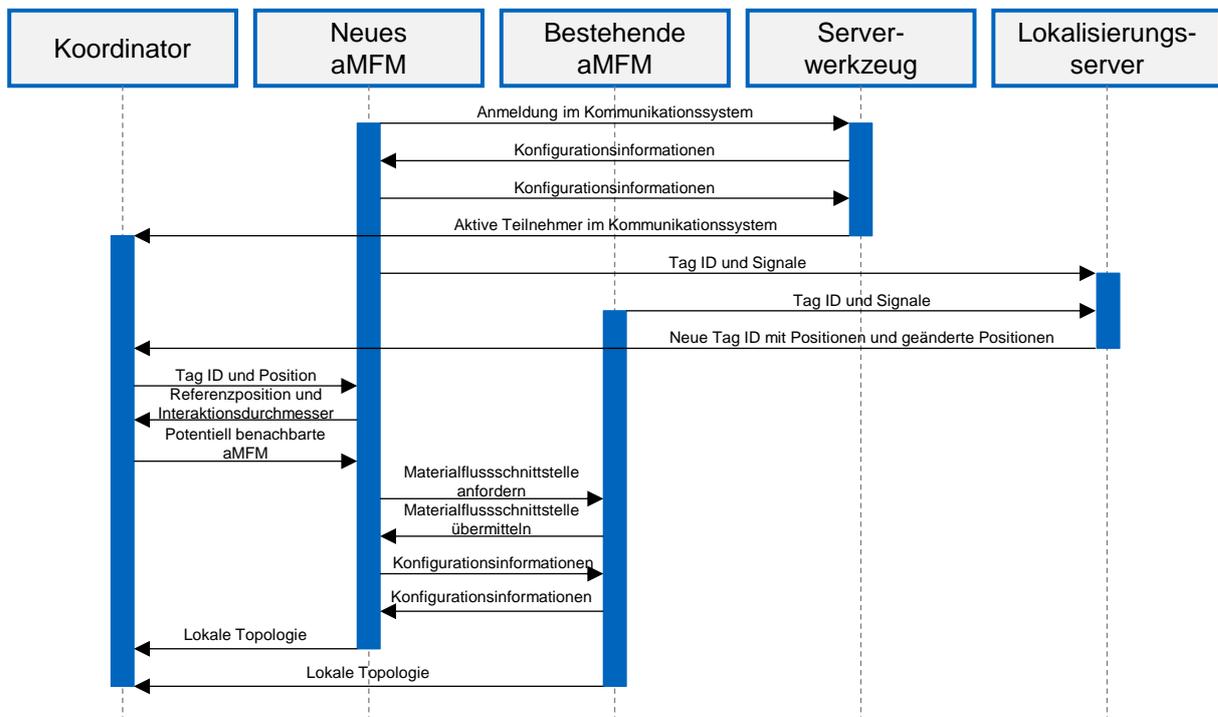


Abbildung 6-14: Sequenzdiagramm des Kommunikationsablaufs zur Konfiguration eines neuen aMFM.

### 6.3 Betriebsphase: Koordination von LO

Die übergeordnete Materialflussebene legt fest, über welches benachbarte aMFM und in welcher Sequenz eine TE in das aMFM ein- und austritt. Zusätzlich werden die logistischen Zusatzfunktionen vorgegeben. Auf dieser Basis wählt das aMFM das passende Transportangebot für eine TE aus. aMFM mit der Fähigkeit mehrere TE gleich-

zeitig zu transportieren koordinieren die Ausführung der Transportangebote verschiedener TE, um Blockaden zu vermeiden. Die Arbeitsräume beschreiben wo LO ausgeführt werden und dienen daher als Grundlage für die Koordination.

In einem Arbeitsraum darf nur eine LO gleichzeitig ausgeführt werden, um der LO den uneingeschränkten Zugriff auf die Aktoren und Sensoren sowie den Raum zu garantieren. Die Koordination erfolgt daher in den beiden Dimensionen Arbeitsraum und Zeit (sequenzielle Ausführung der LO). Zu diesem Zweck besitzt ein aMFM einen Ausführungsplan, der in Form einer Matrix in Arbeitsräume und in Ausführungsschritte unterteilt ist. Ein aMFM plant die LO in die Einträge des Ausführungsplans ein, wobei einem Eintrag nur eine LO zugeordnet werden darf. In Abbildung 6-15 ist für das Beispiel der T-Kreuzung mit zwei anstehenden Transporten für TE1 und TE2 das Programm der LO in den Ausführungsplan eingetragen. Die LO von TE2 starten erst nach Abschluss der LO von TE1. Neben dem Programmnamen vermerkt die Funktionsebene die Ausführungsparameter wie z. B. TE ID, Eintritts-, Austrittspunkt und Freigabestatus. Die TE ID wird beispielsweise verwendet, um eine Statusmeldung der Systemebene einem Transport zuzuordnen.

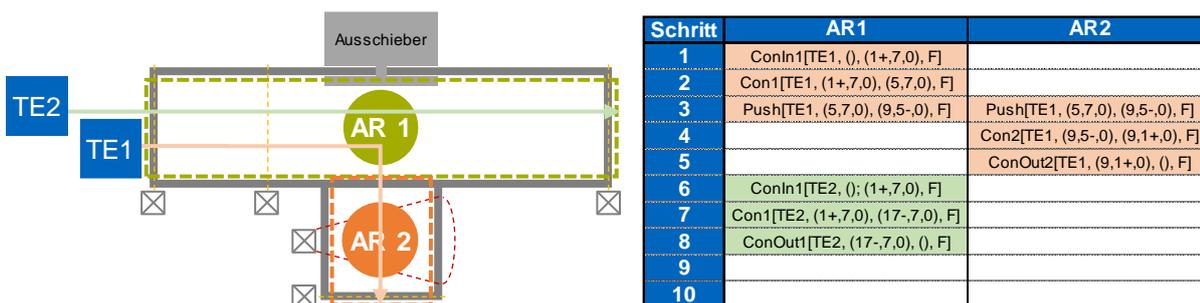


Abbildung 6-15: Beispiel für einen Ausführungsplan der T-Kreuzung.

Insbesondere im Falle von mehreren möglichen Ein- und Austrittspunkten gibt der Ausführungsplan die Übergabepunkte vor, die das Programm anfahren muss. Die Nutzung eines Freigabestatus ermöglicht zunächst die Einplanung von LO, die aber erst zu einem definierten Zeitpunkt starten dürfen. Beispielsweise können für eine TE, die auf einem aMFM gepuffert wird, bereits die LO für den späteren Weitertransport eingeplant und durch andere TE berücksichtigt werden, aber die Ausführung erst zu einem späteren Zeitpunkt starten. Der Ausführungsplan erfüllt Anforderung AK10, variierende Materialflussströme mit flexibel erstellten Abläufen zu koordinieren und zu steuern.

### 6.3.1 Optimierung der LO-Ausführung

Der Ausführungsplan stellt die Belegung der einzelnen aMFM Arbeitsräume transparent dar. Dies ermöglicht die Koordination und parallele Durchführung von mehreren Transporten, da das aMFM Blockaden frühzeitig erkennt und somit vermeiden kann.

Die parallele Ausführung von LO unterschiedlicher TE erfordert eine Optimierung des Ausführungsplans, da die LO der TE zunächst hintereinander eingeplant werden. Die Optimierung erfolgt durch Verschieben der LO in frühere Ausführungsschritte. Hierbei gelten die beiden folgenden Verschieberegeln:

1. Eine LO darf eine andere LO in ihrem Arbeitsraum nicht überholen.
2. Erstreckt sich eine LO über mehrere Arbeitsräume, darf in keinem der Arbeitsräume eine andere LO überholt werden.

Die beiden Verschieberegeln stellen sicher, dass bei der Optimierung durch Verschiebung die LO Sequenz innerhalb eines Arbeitsraums nicht verändert wird. Die bei der Planung festgelegte Sequenz schließt Blockaden bereits aus, da für jede LO die benötigten Arbeitsräume exklusiv reserviert sind. Auch nach der Optimierung durch Verschiebung bleibt die Sequenz der exklusiven Reservierungen (LO) gleich und somit ist sichergestellt, dass keine Blockaden auftreten [Maz-2001, S. 761ff.]. In Abbildung 6-16 sind für das Beispiel der T-Kreuzung zwei Beispiele für eine Optimierung durch Verschiebung gezeigt. Im linken Beispiel erfolgt eine Verschiebung in Arbeitsraum AR1 für die LO der TE2 nach Verschieberegeln 1. Durch die Optimierung beginnt der Transport von TE2 bereits nach dem Ausschleusen von TE1 aus AR1 und nicht erst nachdem TE1 das aMFM verlässt. Im rechten Beispiel erfolgt eine Verschiebung nach Verschieberegeln 2 parallel in AR1 und AR2, bis in einem der beiden Arbeitsräume eine LO an die LO einer anderen TE angrenzt (grau markiert). Durch die Optimierung startet der Transport von TE1 in AR1 früher, so dass TE1 ausgeschoben wird, sobald AR2 frei ist. Hierdurch reduziert sich die Wartezeit in AR2 für die nächste TE.

| Schritt | AR1                               | AR2                              | Schritt | AR1                             | AR2                              |
|---------|-----------------------------------|----------------------------------|---------|---------------------------------|----------------------------------|
| 1       | ConIn1[TE1, (), (1+,7,0), F]      |                                  | 1       | ...                             | ...                              |
| 2       | Con1[TE1, (1+,7,0), (5,7,0), F]   |                                  | 2       |                                 | ...                              |
| 3       | Push[TE1, (5,7,0), (9,5-,0), F]   | Push[TE1, (5,7,0), (9,5-,0), F]  | 3       | ConIn1[TE1, (), (1+,7,0), F]    | ...                              |
| 4       | ConIn1[TE2, (); (1+,7,0), F]      | Con2[TE1, (9,5-,0), (9,1+,0), F] | 4       | Con1[TE1, (1+,7,0), (5,7,0), F] | ...                              |
| 5       | Con1[TE2, (1+,7,0), (17-,7,0), F] | ConOut2[TE1, (9,1+,0), (), F]    | 5       | Push[TE1, (5,7,0), (9,5-,0), F] | Push[TE1, (5,7,0), (9,5-,0), F]  |
| 6       | ConOut1[TE2, (17-,7,0), (), F]    |                                  | 6       |                                 | Con2[TE1, (9,5-,0), (9,1+,0), F] |
| 7       |                                   |                                  | 7       |                                 | ConOut2[TE1, (9,1+,0), (), F]    |
| 8       |                                   |                                  | 8       |                                 |                                  |

— Grenze der Optimierung durch Verschiebung in einen früheren Ausführungsschritt

Abbildung 6-16: Beispiele für die Optimierung des Ausführungsplans der T-Kreuzung.

### 6.3.2 Ausführung von LO

Der Ausführungsplan stellt die Schnittstelle zur Systemebene dar und gibt die Reihenfolge, die Programmnamen und die Programmparameter vor. Die Systemebene nimmt dabei keine Veränderungen in der Reihenfolge oder Schrittposition im Ausführungsplan vor, sondern arbeitet nur nach der vorgegebenen Reihenfolge. Die Systemebene führt nur Programme aus, die in Einträgen im ersten Ausführungsschritt stehen und

freigegeben sind. Sind im ersten Ausführungsschritt für mehrere Arbeitsräume Einträge vorhanden, erfolgt eine parallele Ausführung der Programme in den jeweiligen Arbeitsräumen. Nach der Ausführung eines Programms löscht die Systemebene den Eintrag. Wenn alle Einträge im ersten Ausführungsschritt ausgeführt und somit gelöscht sind, wird die Zeile des ersten Ausführungsschritts gelöscht und die Einträge des zweiten Ausführungsschritts stehen zur Ausführung an.

Die Lokalisierung einer TE innerhalb eines aMFM erfolgt durch das Verfolgen der LO. Eine TE befindet sich physisch entweder außerhalb eines aMFM (noch keine Übergabe gestartet) oder in dem Arbeitsraum, in dem der nächste Eintrag für die TE vorhanden ist. Muss der Ausführungsplan beispielsweise durch ein unerwartetes Ereignis geändert werden, erfolgt dies für eine TE vom aktuellen Arbeitsraum aus.

### 6.3.3 Strategische LO-Einplanung

Die Reihenfolge der TE im Ausführungsplan beeinflusst die Kapazität eines aMFM, wenn TE aufeinander warten und die Wartezeit von den LO der Vorgänger TE abhängt. Dies ist z. B. bei einem aMFM vom Typ H-Kreuzung der Fall, wie in Abbildung 6-17 gezeigt.

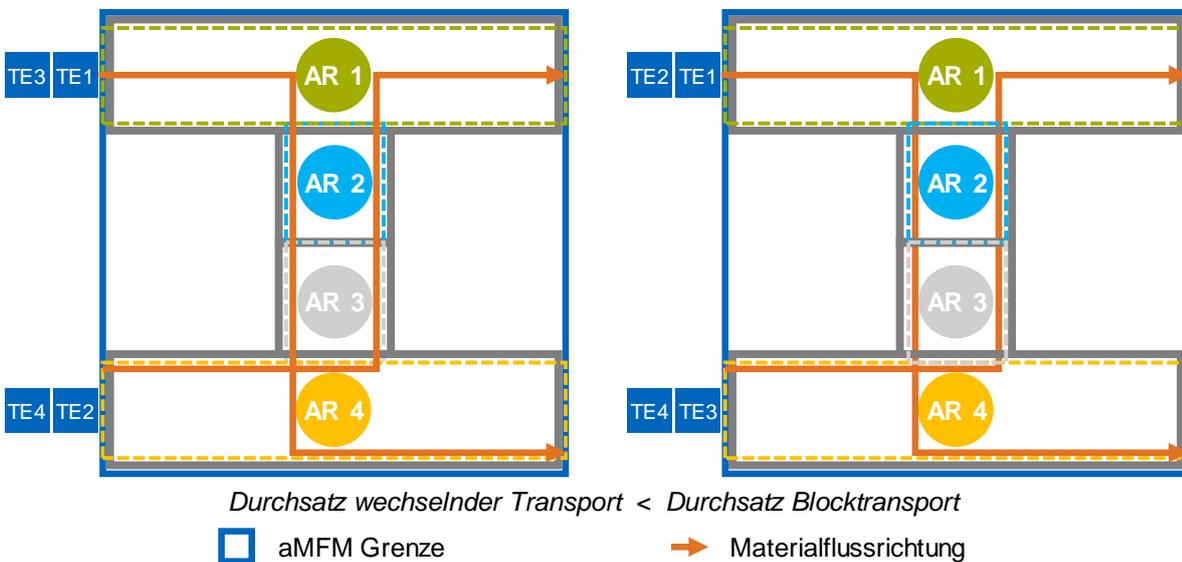


Abbildung 6-17: Beispiele für die TE-Reihenfolge auf einem H-Kreuzung-aMFM mit Einfluss auf die Kapazität.

In beiden Beispielen sollen jeweils 4 TE über die H-Kreuzung von links nach rechts gefördert werden. Im linken Beispiel wird zunächst TE 1 gefördert und TE 2 wartet, bis TE 1 aus Arbeitsraum AR 4 und damit dem aMFM ausgetreten ist. Die anderen TE warten analog aufeinander. Im rechten Beispiel folgt TE 2 direkt auf TE 1, sobald TE 1 den nächsten Arbeitsraum freigibt. Nur TE 3 wartet, bis TE 2 aus AR 4 und damit dem aMFM

austritt, und  $TE4$  folgt wiederum  $TE3$ . Hierdurch reduziert sich die Gesamtwartezeit der TE und die Belegungsdauer des aMFM, so dass Kapazität für zusätzliche TE besteht. Die TE-Reihenfolge auf dem mittleren Segment einer H-Kreuzung hat einen wesentlichen Einfluss auf die Kapazität. Je mehr TE direkt hintereinander (im Block) in derselben Richtung das mittlere Segment passieren, desto höher ist der Durchsatz der H-Kreuzung. Für jeden Richtungswechsel des mittleren Segments fällt eine Wartezeit an, bis das mittlere Segment (Arbeitsraum AR2 und AR3) frei ist und für die andere Richtung genutzt werden kann.

Der Einfluss der TE-Reihenfolge beziehungsweise der LO-Reihenfolge auf die Kapazität eines aMFM hängt von der Gestaltung des aMFM ab. Somit sind auch die Strategien zur Planung der Reihenfolge abhängig vom aMFM Typ und individuell implementiert. Einplanungsstrategien für LO verfügen über die Möglichkeit, neue LO nicht nur am Ende des Ausführungsplans einzuplanen, sondern zwischen bestehenden LO einzufügen. Für eine H-Kreuzung sucht eine Einplanungsstrategie beispielsweise die nächste TE mit derselben Richtung und plant die LO der neuen TE direkt im Anschluss ein, wie in Abbildung 6-18 gezeigt.

| Schritt | AR1          | AR2          | AR3          | AR4          |
|---------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 1       | LO[TE1, ...] |              |              |              |
| 2       | LO[TE1, ...] | LO[TE1, ...] |              |              |
| 3       |              | LO[TE1, ...] | LO[TE1, ...] |              |
| 4       |              |              | LO[TE1, ...] | LO[TE1, ...] |
| 5       |              |              |              | LO[TE1, ...] |
| 6       |              |              |              | LO[TE2, ...] |
| 7       |              |              | LO[TE2, ...] | LO[TE2, ...] |
| 8       |              | LO[TE2, ...] | LO[TE2, ...] |              |
| 9       | LO[TE2, ...] | LO[TE2, ...] |              |              |
| 10      | LO[TE2, ...] |              |              |              |
| 11      | LO[TE3, ...] |              |              |              |
| 12      | LO[TE3, ...] | LO[TE3, ...] |              |              |
| 13      |              | LO[TE3, ...] | LO[TE3, ...] |              |
| 14      |              |              | LO[TE3, ...] | LO[TE3, ...] |
| 15      |              |              |              | LO[TE3, ...] |
| 16      |              |              |              |              |

| Schritt | AR1          | AR2          | AR3          | AR4          |
|---------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 1       | LO[TE1, ...] |              |              |              |
| 2       | LO[TE1, ...] | LO[TE1, ...] |              |              |
| 3       | LO[TE3, ...] | LO[TE1, ...] | LO[TE1, ...] |              |
| 4       | LO[TE3, ...] | LO[TE3, ...] | LO[TE1, ...] | LO[TE1, ...] |
| 5       |              | LO[TE3, ...] | LO[TE3, ...] | LO[TE1, ...] |
| 6       |              |              | LO[TE3, ...] | LO[TE3, ...] |
| 7       |              |              |              | LO[TE3, ...] |
| 8       |              |              |              | LO[TE2, ...] |
| 9       |              |              | LO[TE2, ...] | LO[TE2, ...] |
| 10      |              | LO[TE2, ...] | LO[TE2, ...] |              |
| 11      | LO[TE2, ...] | LO[TE2, ...] |              |              |
| 12      | LO[TE2, ...] |              |              |              |
| 13      |              |              |              |              |
| 14      |              |              |              |              |
| 15      |              |              |              |              |
| 16      |              |              |              |              |

Abbildung 6-18: Einplanung der neuen LO von TE3 links ohne und rechts mit Einplanungsstrategie für das Beispiel der H-Kreuzung aus Abbildung 6-17.

Die individuellen Einplanungsstrategien für LO müssen dabei folgende allgemeine Grundsätze erfüllen:

1. Die LO unterschiedlicher TE dürfen nicht miteinander vermischt werden
2. Neue LO dürfen nicht vor LO einer TE eingeplant werden, die bereits ausgeführt werden
3. Die TE Sequenz an den Ein- und Ausgängen eines aMFM darf nicht verändert werden

Erfüllen die Einplanungsstrategien die aufgestellten Grundsätze, ist sichergestellt, dass keine unkontrollierten Zustände wie Blockierungen auftreten. Der erste Grundsatz verhindert, dass das Einfügen neuer LO bestehende LO-Ketten durchtrennt, wodurch die Reihenfolge der exklusiven Arbeitsraum-Reservierungen verletzt wird. In Abbildung 6-19 ist im linken Beispiel die Situation dargestellt, dass die Einplanungsstrategie die LO der TE3 zwischen den LO der TE2 einfügt. In diesem Fall kommt es zu einer Blockierung zwischen TE2 und TE3, die beide zur gleichen Zeit in entgegengesetzter Richtung im selben Arbeitsraum eingeplant sind.

Der zweite Grundsatz verhindert, dass neue TE die Ausführung von LO beeinträchtigen. Im mittleren Beispiel ist die Situation dargestellt, dass die Einplanungsstrategie die LO von TE3 vor den LO von TE2 einfügt, obwohl die Ausführung der LO von TE2 bereits begonnen hat. TE2 muss laut Ausführungsplan auf TE3 warten. Da die Ausführung von TE2 aber bereits begonnen hat, kann es zu einer Blockierung mit TE3 kommen in Abhängigkeit des Fortschritts der Ausführung.

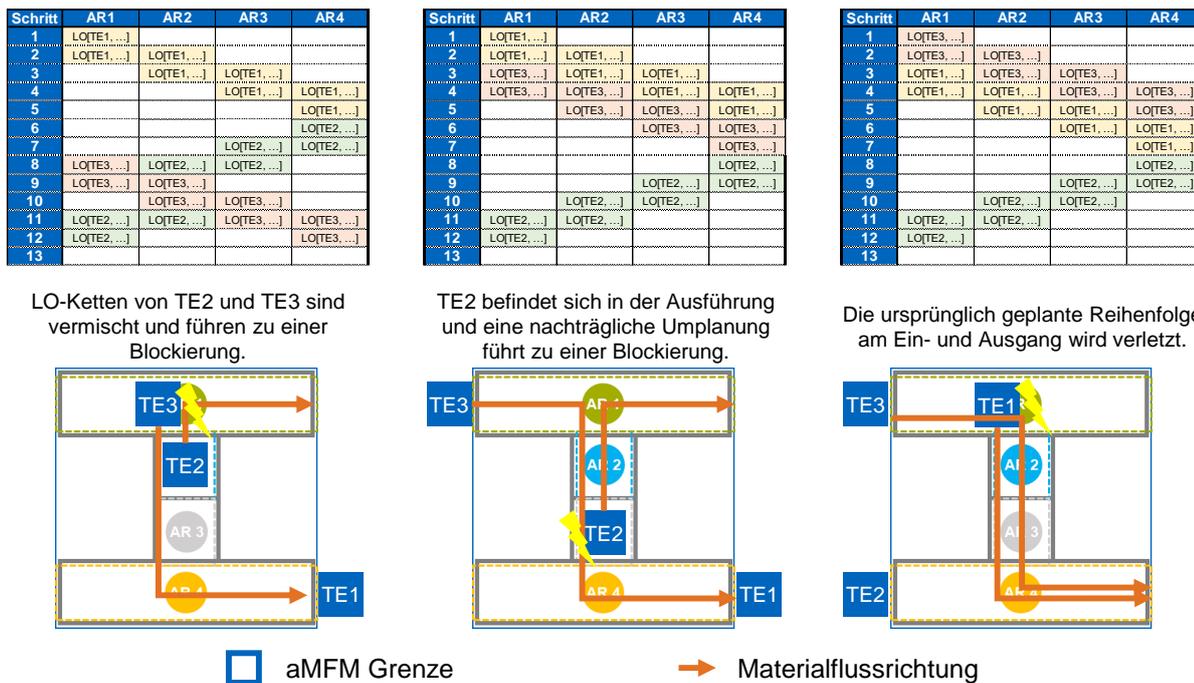


Abbildung 6-19: Beispiele für die Anwendung von Einplanungsstrategien mit Verletzung der aufgestellten Grundsätze.

Die übergeordnete Materialflussplanung gibt die TE-Reihenfolge an den Ein- und Ausgängen vor und berücksichtigt dabei sämtliche Transporte im aMFS. Die Reihenfolge an den Ein- und Ausgängen muss eingehalten werden, um unkontrollierbare Zustände wie Blockierungen an nachfolgenden aMFM im aMFS zu vermeiden. Daher erstreckt sich der Handlungsspielraum der Einplanungsstrategien für LO auf die Optimierung der TE-Reihenfolge innerhalb der Arbeitsräume, aber nicht auf die Ein- und Ausgänge.

Im Beispiel rechts ist die Situation dargestellt, dass eine Einplanungsstrategie *TE3* vor *TE1* einfügt. *TE3* und *TE1* treten über denselben Eingang ein und über denselben Ausgang aus dem aMFM aus. Somit erfolgt eine Verletzung der von der übergeordneten Materialflussplanung vorgegebenen Sequenz am Ein- und Ausgang. Erfüllen Einplanungsstrategien die aufgestellten Grundsätze, ist ein aMFM in der Lage, selbstständig eine interne und individuelle Optimierung der Materialflussströme durchzuführen ohne die Koordination der Transporte im aMFS zu beeinträchtigen. Somit ist Anforderung *AK11* erfüllt, individuelle aMFM Strategien anzuwenden.



## 7 Grundlagen der Routenplanung unter Berücksichtigung von Transportabhängigkeiten

---

Den Abschluss des vorangegangenen Kapitels bildet die Koordination und Ausführung von Transporten innerhalb eines aMFM. Nach Beendigung der Selbstkonfiguration eines neuen aMFM verfügt das aMFS über Informationen zu den Nachbarschaftsbeziehungen. In diesem Kapitel stehen die aMFM-übergreifenden Abhängigkeiten zwischen den Transporten in einem aMFS im Fokus. Die Nachbarschaftsbeziehungen sind in der lokalen Topologie hinterlegt, auf deren Basis die Ermittlung von Routen durch das aMFS erfolgt. Die Ermittlung und Koordination der Routen basierten auf dem Konzept der semi-statischen Routen. Semi-statische Routen ermöglichen die Auswahl von kürzesten Routen von einem Start zu einem Ziel, die Einbeziehung von TE-Verkehr und die Berücksichtigung von potenziellen gegenseitigen Abhängigkeiten zwischen Transporten.

Dieses Kapitel soll beantworten, welche aMFM-übergreifenden Abhängigkeiten zwischen Transporten bestehen und wie sich der Einfluss auf die Leistungsfähigkeit bewerten lässt.

### 7.1 Ermittlung von Routen in dynamischen Transportnetzwerken

aMFS stellen dynamische Transportnetzwerke für Stückgüter dar. Für die Routenberechnung erfolgt die Modellierung der Topologie von aMFS als Graph mit aMFM als Knoten und Materialflussschnittstellen als Kanten. Die Kantengewichte (Metrik) repräsentieren die Eigenschaften der aMFM. Die Metriken umfassen beispielsweise die Transportzeit zwischen zwei verbundenen Knoten oder die Auslastung der Materialflussschnittstelle. Transportnetzwerke weisen Ähnlichkeiten zu Telekommunikationsnetzwerken auf. In beiden Netzwerken werden virtuelle beziehungsweise physische Pakete über Knoten wie Router oder aMFM über Verbindungen transportiert. Telekommunikationsnetzwerke sind in der Lage, auf Änderungen des Netzwerks oder Verkehrs flexibel zu reagieren. Aufgrund der großen Ähnlichkeit zwischen Transportnetzwerken und Telekommunikationsnetzwerken sowie der umfangreichen Erfahrung, die auf dem Gebiet des Routings in Telekommunikationsnetzwerken bereits vorhanden ist, sollen aMFS in dieser Arbeit auf etablierte Routingverfahren für Telekommunikationsnetzwerke zurückgreifen. Die Auswahl eines Routingverfahrens wirft die folgenden beiden Grundsatzfragen zur Ausgestaltung auf:

- **Statisches oder dynamisches Routingverfahren?**  
Statische Routingverfahren ermitteln einmalig die Topologie und deren Eigenschaften im Gegensatz zu dynamischen Verfahren, die Änderungen in der Topologie erfassen und berücksichtigen.
- **Zentral oder dezentral verfügbare Topologie?**  
Routingverfahren mit einer zentralen Topologie haben Kenntnis über die komplette Systemtopologie im Gegensatz zu dezentralen Verfahren, die nur über einen lokalen Ausschnitt der Topologie verfügen.

### 7.1.1 Vergleich von statischen und dynamischen Routingverfahren

Unveränderliche Netzwerke mit gleichbleibenden Anforderungen eignen sich für statische Routingverfahren, bei denen die Ermittlung der Informationen einmalig zu Beginn erfolgt. Das Routingverfahren berechnet alle geforderten Routen einmalig und greift bei Bedarf auf diese statischen Routen zurück. Wenn alle Anforderungen zu Beginn bekannt sind, existieren diverse Optimierungsverfahren für die Ermittlung von optimalen statischen Routen. Optimierungsziel ist beispielsweise eine minimale durchschnittliche Durchlaufzeit oder eine gleichmäßige Auslastung des Netzwerks. Die ermittelten Routen sind optimal, solange sich die Anforderungen nicht ändern. Allerdings können statische Routen auch eine gewisse Flexibilität gegenüber variierenden Anforderungen, wie z. B. Änderungen im Transportvolumen, aufweisen, wenn die Routen mit Reserven geplant sind. Reaktionen auf Änderungen im Netzwerk wie z. B. eine neue Quelle oder Senke sind hingegen nicht möglich. Daher eignen sich statische Routen nicht für die Koordination von Transporten in aMFS, die durch ein dynamisches Transportnetzwerk mit schwankenden Anforderungen charakterisiert sind.

Dynamische Routingverfahren ermitteln für jeden Transportauftrag eine Route, die den aktuellen Systemzustand berücksichtigt. Somit ergeben sich für vergleichbare Transportaufträge unterschiedliche Routen in Abhängigkeit des Netzwerkstatus zum Zeitpunkt des Transportauftrags. Dynamische Routingverfahren erfordern Wissen über den aktuellen Zustand des Systems, um beispielsweise die Route hinsichtlich des Transportaufkommens optimal zu planen. Der Systemzustand ist in den Metriken der Verbindungen hinterlegt und umfasst z. B. die Transportzeit und das Verkehrsaufkommen. Dynamische Routingverfahren ermitteln dann für jeden Transport eine neue Route mit der aktuell besten Metrik. Strategische Optimierungen, wie z. B. die Minimierung von gegenseitigen Abhängigkeiten zwischen Transporten, sind nur begrenzt und mit hohem Aufwand umsetzbar, da Eingriffe in das Routingverfahren nur indirekt über die Manipulation der Metriken und damit des Systemzustands möglich sind.

Die Kombination von dynamischen und statischen Routingverfahren stellt eine weitere Option dar. Hierfür unterteilt das Routingverfahren das Netzwerk in verschiedene Bereiche, für die sich entweder ein dynamisches oder statisches Routing eignet. Bereiche mit konstanten Anforderungen verwenden statische Routingverfahren und die anderen Bereiche dynamische Routingverfahren. Allerdings muss hierfür zunächst eine Segmentierung des Netzwerks in geeignete Bereiche stattfinden. In Abbildung 7-1 sind die verschiedenen Ausgestaltungen des Routingverfahrens schematisch abgebildet.

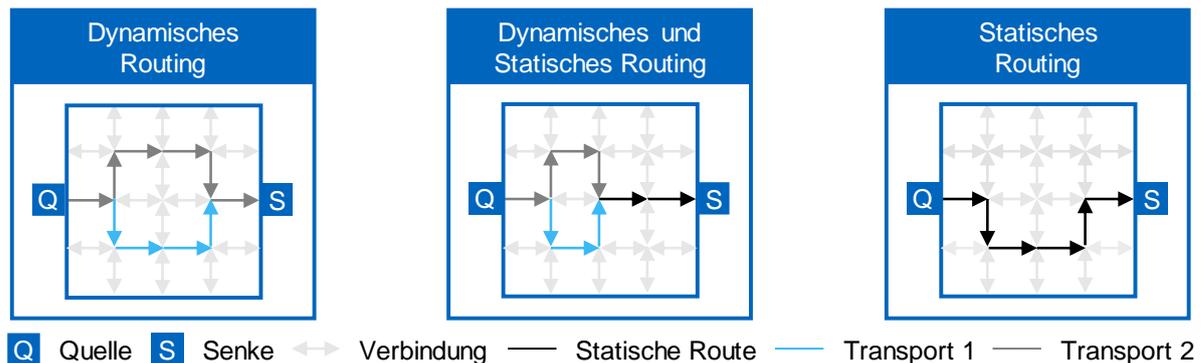


Abbildung 7-1: Schematische Darstellung der Gestaltungsmöglichkeiten eines Routingverfahrens für Transportnetzwerke.

### 7.1.2 Unterscheidungsmerkmale zwischen aMFS und Telekommunikationsnetzwerken

Im Gegensatz zu Telekommunikationsnetzwerken transportiert ein aMFS physische Pakete mit den folgenden Einschränkungen:

1. Pakete besitzen eine gegenseitige physische Abhängigkeit. Daher ist ein gleichzeitiger Transport auf derselben Strecke in gegenläufige Richtungen nicht möglich.
2. Im Falle eines Konfliktes (z. B. Blockierungen oder Überlastungen) ist es nicht möglich, Pakete einfach zu löschen und neu zu senden.
3. Pakete können an Knoten nicht zwischengepuffert oder neu sortiert werden, wenn der Knoten es aufgrund seiner Beschaffenheit nicht erlaubt.
4. Die Eigenschaften eines Knotens (z. B. Durchsatz) können von den Transporteigenschaften (z. B. Richtung) und deren Abfertigung (z. B. Blockabfertigung) abhängen.

Insbesondere die erste Einschränkung stellt eine erhebliche Herausforderung für die Adaptierung von Routingverfahren für Telekommunikationsnetzwerke auf aMFS dar. Der Verkehr in aMFS verhält sich richtungsabhängig (anisotrop) und besitzt somit Einfluss auf die Transportzeiten und Kapazitäten von Verbindungen. Somit berechnet sich die Metrik einer Verbindung in Abhängigkeit der Transportrichtungen. In Abbildung 7-2

ist dieser Zusammenhang gezeigt. Um von der linken zur rechten Seite oder umgekehrt zu gelangen, findet ein Transport entweder über die untere oder obere Kante statt. In Telekommunikationsnetzwerken können die untere und obere Kante für Transporte in beide Richtungen (bidirektional) beinahe gleichzeitig verwendet werden oder eine Kante wird für Transporte von links nach rechts und eine andere für Transporte von rechts nach links verwendet (unidirektional). In beiden Fällen erreicht das System die gleichen Durchsätze und Transportzeiten. In Transportnetzwerken hingegen führt eine bidirektionale Belegung einer Kante dazu, dass vor jedem Transport geprüft werden muss, ob gerade ein Transport in die entgegengesetzte Richtung stattfindet. Falls dies der Fall ist, muss eine TE warten, bis der Transport abgeschlossen ist. Bei einer unidirektionalen Belegung kommen sich die gegenläufigen Transporte nur an den beiden Kreuzungen in die Quere. Die unidirektionale Belegung erzielt in der Folge deutlich höhere Durchsätze und kürzere Transportzeiten, da gegenläufige Transporte nicht mehr aufeinander warten müssen.

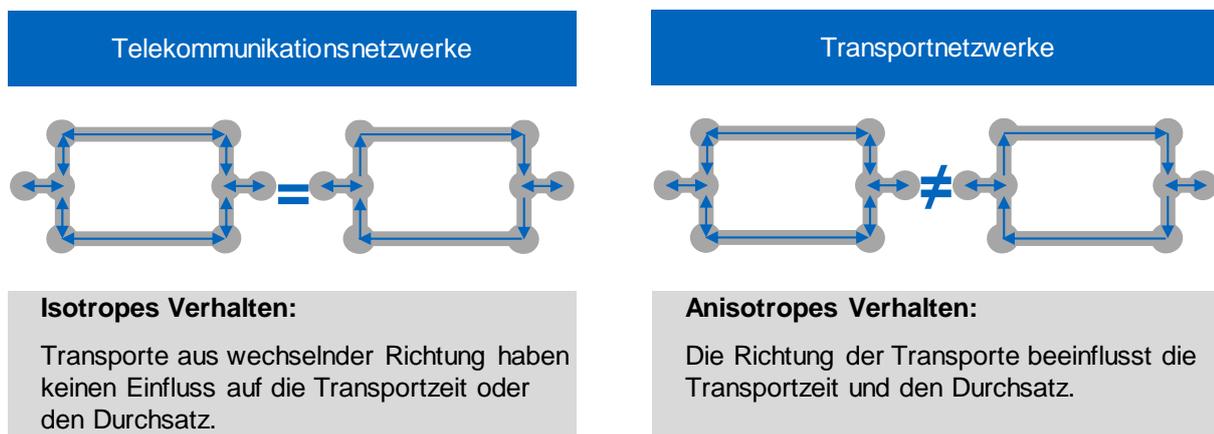


Abbildung 7-2: In Telekommunikationsnetzwerken hat die Richtung der Transporte keinen Einfluss auf die Transportzeit oder den Durchsatz während bei Transportnetzwerken eine Abhängigkeit besteht.

### 7.1.3 Einsatz von semi-statischen Routen in Transportnetzwerken

Traffic Engineering reduziert in Telekommunikationsnetzwerken Überlastungen an Knoten und Verbindungen durch eine bessere Verteilung des Verkehrs. Die Anwendung von Traffic Engineering in aMFS verlangt zusätzlich die Berücksichtigung der Richtung des Verkehrs, um den Durchsatz von Verbindungen zu steigern und die Transportzeit zu reduzieren. Traffic Engineering für dynamische Routingverfahren manipuliert die Metriken von Verbindungen und ermöglicht somit eine Steuerung des Verkehrs, um z. B. wenig ausgelastete Bereiche eines Netzwerkes besser auszulasten. Allerdings handelt es sich hierbei um eine indirekte Beeinflussung des Verkehrs, da das Traffic Engineering über die Metriken nur die Entscheidungsbasis für die Routenermittlung manipuliert, aber nicht direkt in die Ermittlung der Routen eingreift. Die

Manipulation der Entscheidungsbasis führt dazu, dass auch die Routenermittlung von Transporten beeinflusst wird, die nicht im Fokus einer Optimierung stehen. Diese unabsichtliche Beeinflussung führt mitunter zu ungewollten Systemzuständen.

In aMFS kommt für das Traffic Engineering bei dynamischen Routingverfahren zusätzlich die Herausforderung der physischen Abhängigkeit zwischen Paketen hinzu. In Telekommunikationsnetzwerken äußern sich ungewollte Systemzustände z. B. darin, dass an unvorhergesehenen Stellen im System Überlastungen auftreten. In aMFS treten die gleichen Effekte auf. Zusätzlich kommen noch ungewollte Abhängigkeiten zwischen Transporten hinzu. Durch die indirekt herbeigeführte Umleitung von Transporten, entstehen z. B. ineffiziente bidirektionale Transporte auf einer anderen Strecke.

Statische Routingverfahren sind in der Lage durch eine offline-Optimierung die Transporte in einem Netzwerk effizient zu gestalten und dabei die zusätzlichen Einschränkungen von aMFS zu berücksichtigen [fml-2018c]. Allerdings berücksichtigt ein statisches offline-Verfahren Änderungen im Verkehr oder der Topologie des Netzwerks erst nach dem nächsten Optimierungslauf. Diese Arbeit setzt daher auf das in Telekommunikationsnetzwerken erprobte Routingverfahren MPLS und adaptiert dieses für die Steuerung des Verkehrs in aMFS.

MPLS richtet in einem Telekommunikationsnetzwerk statische Routen mit einer reservierten Bandbreite ein. Obwohl MPLS feste Routen einrichtet, handelt es nicht um ein statisches Routingverfahren, da es die Routen dynamisch nach festgelegten Kriterien anpasst. Somit handelt es sich um temporäre statische Routen, die im Folgenden als semi-statische Routen (ssR) bezeichnet werden. ssR ermöglichen die Verteilung des Verkehrs in einem Netzwerk und garantieren jeder Route eine Kapazität, bei deren Einhaltung es zu keinen Überlastungen im Netzwerk kommt. ssR gelten statisch für einen gewissen Zeitraum und alle Transporte mit dem gleichen Start und Ziel verwenden dieselbe ssR. Dadurch, dass ssR für einen gewissen Zeitraum stabil sind, besteht für die Zukunft Planungssicherheit. Die Dauer der Planungssicherheit hängt von der Dynamik des aMFS ab. Die Planungssicherheit ermöglicht es, neue ssR einzuplanen und hierbei die negativen gegenseitigen Abhängigkeiten zu minimieren. Die Reduzierung von negativen Abhängigkeiten ist z. B. durch die Einrichtung einer Vorzugsrichtung auf bidirektionalen Strecken möglich, um hierdurch die Anzahl der gegenläufigen Transporte zu minimieren. MPLS erfüllt Anforderung AT1, Layoutänderungen zu berücksichtigen, und Anforderung AT2, Verkehr zu betrachten.

Telekommunikationsnetzwerke setzen MPLS parallel zu anderen Verfahren wie z. B. dynamischem Routing ein. Somit muss MPLS nicht für jeden auftretenden Transport eine Route vorhalten, sondern nur in Bereichen, in denen MPLS einen Mehrwert bringt.

Es existieren verschiedene Verfahren anhand derer entschieden wird, ob ein Transport eine MPLS Route nimmt oder ein anderes Routingverfahren verwendet. Die Verwendung mehrerer Verfahren in einem Netzwerk führt allerdings zu einer zusätzlichen Komplexität in der Steuerung. Nachdem Netzwerke von aMFS deutlich kleiner sind als Telekommunikationsnetzwerke und über definierte Quellen und Senken für Transporte verfügen, soll für das Traffic Engineering in aMFS ausschließlich auf ssR zurückgegriffen werden.

Die Ermittlung von MPLS Routen benötigt eine zentrale Topologie. Die gesamte Topologie des Netzwerks oder der Bereiche, in denen MPLS eingerichtet ist, muss daher an der Stelle vorliegen, die die MPLS Routen ermittelt. Somit handelt es sich bei MPLS um ein Routingverfahren mit einer zentralen Topologie.

## **7.2 Ermittlung von lokalen aMFM und globalen aMFS Topologien**

Die Ermittlung von ssR erfolgt auf Basis der aMFS Topologie und berücksichtigt die Transportzeit und Kapazität der Verbindungen. Der nachfolgende Abschnitt beschreibt die Berechnung der lokalen aMFM und globalen aMFS Topologie. Neben den Eigenschaften eines aMFM fließen bei der Berechnung der Topologie auch die Abhängigkeiten zwischen Transporten mit ein.

### **7.2.1 Struktur der aMFS Topologie**

Kapitel 6 beschreibt den Selbstkonfigurationsprozess an dessen Ende aMFM über die lokale Topologie verfügen. Für ssR fügt das aMFS die lokalen zu einer globalen Topologie zusammen. Telekommunikationsnetzwerke greifen zu diesem Zweck auf Link-State-Verfahren zurück, bei denen die Knoten die lokale Topologie an alle anderen Knoten versenden. Bei jeder Änderung versenden die Knoten die lokale Topologie erneut, wodurch Link-State Verfahren in Netzwerken mit vielen Änderungen einen hohen Kommunikationsaufwand verursachen.

Die lokale und globale Topologie werden mit einer Adjazenzmatrix beschrieben, in der die Eigenschaften jeder Verbindung in einem Eintrag hinterlegt sind. Eine Verbindung entspricht dem Partialstrom eines aMFM, also dem Transport von einem Eingang zu einem Ausgang. Die Anzahl der Verbindungen richtet sich somit nach der Anzahl der Ein- und Ausgänge eines aMFM. In aMFS können die aMFM als Ganzes nicht als Start- und Zielknoten verwendet werden, da die Eigenschaft der Verbindung vom Vorgänger- und Nachfolgerknoten abhängt.

In Abbildung 7-3 ist ein QVW gezeigt mit mehreren Zu- und Abführstrecken. Der QVW sowie die Zu- und Abführstrecken sind jeweils als eigenständiges aFMF (blauer Rahmen) definiert. Für das Beispiel der Verbindung von QVW aFMF7 zu Zuführstrecke aFMF3 ist als Eigenschaft unter anderem die Transportzeit hinterlegt. Allerdings hängt die Transportzeit durch das gesamte aFMF7 davon ab, welche Zuführstrecke die TE an den QVW übergibt. Für aFMF6 ergeben sich kürzere Transportzeiten als für aFMF4, da der QVW bei aFMF6 nicht verfahren muss. Eine Lösung des Problems stellt eine angepasste Modellierung des Graphen dar, bei der jeweils der Aus- und der Eingang von benachbarten aFMF als Knoten modelliert werden (rote Punkte). Das aFMF kann nun für jede Verbindung zwischen den Knoten unter Berücksichtigung der Fahrstrecke die Eigenschaften berechnen.

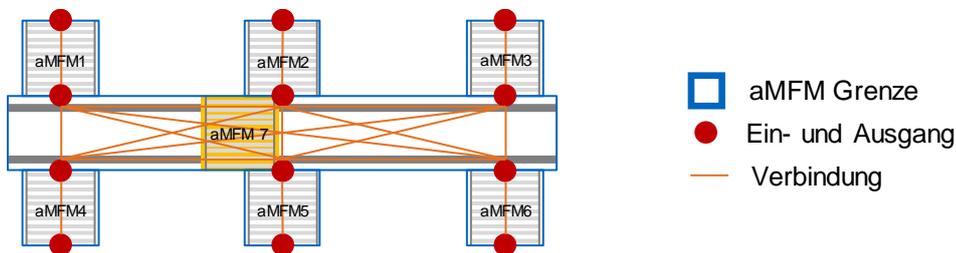


Abbildung 7-3: Schematische Abbildung eines QVW mit Zu- und Abführstrecken als eigenständige aFMF.

Die Modellierung der Ein- und Ausgänge als Knoten führt zu einem zu größeren Dimensionen der lokalen und globalen Adjazenzmatrizen, wie in Abbildung 7-4 Mitte veranschaulicht.

Adjazenzmatrix mit aFMF

|           |   | Von aFMF |   |   |   |   |   |   |
|-----------|---|----------|---|---|---|---|---|---|
|           |   | 1        | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| Nach aFMF | 1 |          |   |   |   |   |   | x |
|           | 2 |          |   |   |   |   |   | x |
|           | 3 |          |   |   |   |   |   | x |
|           | 4 |          |   |   |   |   |   | x |
|           | 5 |          |   |   |   |   |   | x |
|           | 6 |          |   |   |   |   |   | x |
|           | 7 | x        | x | x | x | x | x | x |

**Lesebeispiel:**  
aFMF 1 → 7: Transport von aFMF 1 nach aFMF 7 mit den Eigenschaften x möglich.

Adjazenzmatrix mit aFMF Ein- und Ausgängen

|                   |     | Von aFMF-Eingang |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|-------------------|-----|------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|                   |     | M-1              | 1-7 | M-2 | 2-7 | M-3 | 3-7 | M-4 | 4-7 | M-5 | 5-7 | M-6 | 6-7 |
| Nach aFMF-Ausgang | M-1 |                  | x   |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|                   | 1-7 | x                |     |     |     |     | x   |     |     |     | x   |     | x   |
|                   | M-2 |                  |     |     | x   |     |     |     |     |     |     |     |     |
|                   | 2-7 |                  | x   | x   |     |     | x   |     | x   |     | x   |     | x   |
|                   | M-3 |                  |     |     |     |     | x   |     |     |     |     |     |     |
|                   | 3-7 |                  | x   |     | x   | x   |     |     | x   |     | x   |     | x   |
|                   | M-4 |                  |     |     |     |     |     |     | x   |     |     |     |     |
|                   | 4-7 |                  | x   |     | x   |     | x   | x   |     |     |     | x   | x   |
|                   | M-5 |                  |     |     |     |     |     |     |     |     |     | x   |     |
|                   | 5-7 |                  | x   |     | x   |     | x   |     | x   | x   |     |     | x   |
|                   | M-6 |                  |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     | x   |
|                   | 6-7 |                  | x   |     | x   |     | x   |     | x   |     | x   | x   | x   |

**Lesebeispiel:**  
Schnittstelle M-1 → 1-7: Transport von Schnittstelle M-1 (Schnittstelle zwischen einem benachbarten aFMF M, nicht dargestellt, und aFMF 1) zu Schnittstelle 1-7 (Schnittstelle zwischen aFMF 1 und 7) mit den Eigenschaften x möglich.

Modifizierte Adjazenzmatrix

|                  |   | Von aFMF (über) |      |      |      |      |      |      |
|------------------|---|-----------------|------|------|------|------|------|------|
|                  |   | 1               | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    |
| Nach aFMF (über) | 1 |                 | 7; x |
|                  | 2 | 7; x            |      | 7; x |
|                  | 3 | 7; x            | 7; x |      | 7; x | 7; x | 7; x | 7; x |
|                  | 4 | 7; x            | 7; x | 7; x |      | 7; x | 7; x | 7; x |
|                  | 5 | 7; x            | 7; x | 7; x | 7; x |      | 7; x | 7; x |
|                  | 6 | 7; x            | 7; x | 7; x | 7; x | 7; x |      | 7; x |
|                  | 7 | 7; x            | 7; x | 7; x | 7; x | 7; x | 7; x |      |

**Lesebeispiel:**  
aFMF 1 → 2: Transport von aFMF 1 über aFMF 7 nach aFMF 2 mit den Eigenschaften x möglich.

Abbildung 7-4: Darstellung der verschiedenen Möglichkeiten, um das QVW-System in Abbildung 7-3 in einer Adjazenzmatrix zu modellieren. Das „x“ markiert eine vorhandene Verbindung mit Eigenschaften. Das „M“ steht als Platzhalter für benachbarte aFMF an den Zu- und Abführstrecken, die nicht abgebildet sind.

Die größeren Matrizen benötigen mehr Zeit in der Verarbeitung und verursachen größere Systemnachrichten. Zum anderen ist eine Zuordnung der Knoten zu einem aMFM nur noch indirekt möglich. Z. B. müssen die Ein- und Ausgänge nach dem zugehörigen aMFM benannt werden oder es existiert ein Verzeichnis, das die Zuordnung ermöglicht. Eine Alternative stellt eine modifizierte Adjazenzmatrix dar, in der die unterschiedlichen Eigenschaften der Ein- und Ausgänge als separate Einträge eingefügt werden, wie in Abbildung 7-4 rechts dargestellt. Die Eigenschaften hängen nun vom Vorgänger- und Nachfolger-aMFM ab. Um kenntlich zu machen über welches aMFM (Transfer-aMFM) die Verknüpfung erfolgt, ist das Transfer-aMFM in den Eigenschaften der Verbindung aufgeführt. Somit wird Anforderung *A75* erfüllt, die Transporteigenschaften nach den Ein- und Austrittspunkten eines aMFM aufzuschlüsseln.

Die aMFM ermitteln lokal die Eigenschaften der Verbindungen, da zum einen die notwendige Datenbasis lokal vorliegt und zum anderen hierdurch eine verteilte Berechnung der Eigenschaften realisiert ist. Darüber hinaus hängen die Berechnungsvorschriften für die Eigenschaften vom Typ des aMFM ab. Die Berechnungsvorschriften für die Verbindungseigenschaften eines aMFM sind lokal in der Wissensbasis hinterlegt. Im Folgenden ist das Vorgehen für die Erstellung einer Berechnungsvorschrift beschrieben:

### 7.2.2 Verbindungseigenschaft: Transportzeit und Belegzeit

Die Transportzeit gibt die Dauer eines Transports an und wird benötigt, um die Gesamttransportzeit einer Route zu berechnen. Die Belegzeit gibt hingegen an, wie lange ein aMFM blockiert ist, um einen Transport auszuführen. Beispielweise muss sich ein Drehtisch zunächst zum Eingang drehen, bevor das benachbarte aMFM eine TE übergibt. In dieser Zeit ist der Drehtisch belegt und nicht für andere TE nutzbar. Falls ein aMFM den Vorbereitungsvorgang parallel zum Transport auf dem Vorgänger-aMFM ausführt und abschließt, bevor das Vorgänger-aMFM den eigenen Transportvorgang abschließt, hat die Dauer des Vorbereitungsvorgangs keinen Einfluss auf die Transportzeit der TE. Falls das Vorgänger-aMFM auf den Abschluss des Vorbereitungsvorgangs warten muss, besteht ein Einfluss auf die Transportzeit der TE. Um die Transportzeit und Belegzeit auf einem aMFM zu ermitteln, werden die folgenden drei Zeitkomponenten definiert und in Abbildung 7-5 beispielhaft dargestellt:

1. **Interne Vorbereitungszeit:** Umfasst die Dauer, die ein aMFM zur Vorbereitung eines Transportes beansprucht, bevor das Vorgänger-aMFM eine TE übergeben kann.
2. **Bearbeitungszeit:** Umfasst die Dauer, die das aMFM für die tatsächliche physische Ausführung eines Transports beansprucht.

3. **Externe Vorbereitungszeit:** Umfasst die Dauer, die eine TE auf einem aMFM warten muss, bis das Nachfolge-aMFM die Vorbereitungen für die Übergabe der TE abschließt.

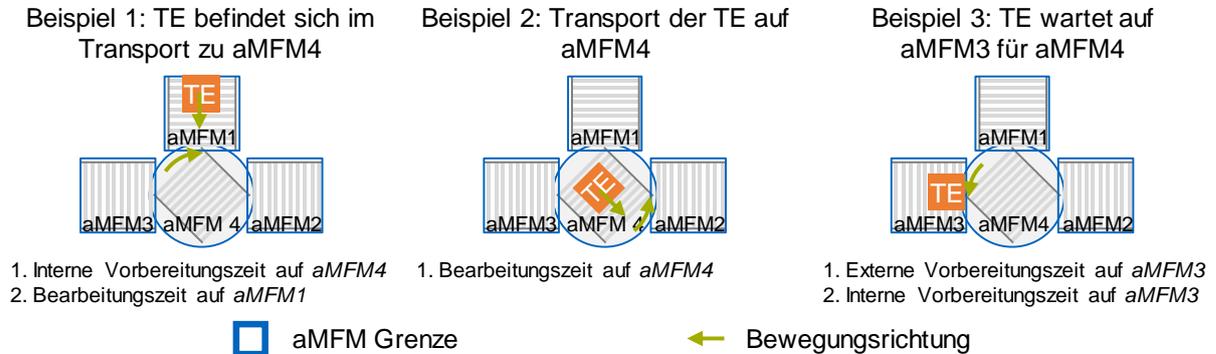


Abbildung 7-5: Darstellung von drei beispielhaften Transportsituationen für einen Drehtisch und den jeweiligen Zeitkomponenten, die auf den aMFM anfallen.

Die Vorbereitungszeit ist dadurch charakterisiert, dass das aMFM durch vorbereitende Tätigkeiten (LO) für eine TE blockiert ist, die sich aber noch nicht auf dem aMFM befindet. Beispielsweise muss ein Drehtisch vor einem Transport zum Eingang gedreht werden. Die Vorbereitungszeit umfasst somit die Zeit für die Positionierung an der Übergabestelle.

Die Bearbeitungszeit umfasst alle LO, die mit der TE auf dem aMFM ausgeführt werden. LO eines aMFM können sowohl der Vorbereitungszeit als auch der Bearbeitungszeit zugeordnet werden. Beispielsweise umfasst der physische Transport einer TE auf einem Drehtisch auch eine Drehung zum Ausgang. Diese LO ist der Bearbeitungszeit zuzuordnen, da die TE das aMFM physisch blockiert.

Im Falle einer externen Vorbereitungszeit wartet eine TE auf die Übergabe auf ein Nachfolger-aMFM, das sich noch auf die Übergabe vorbereitet. Beispielsweise tritt eine externe Vorbereitungszeit auf einem Rollenförderer zu einem Drehtisch auf, wenn der Rollenförderer seinen Transport abgeschlossen hat und der Drehtisch sich noch in die richtige Eingangsposition dreht. Eine Reduzierung der externen Vorbereitungszeit ist z. B. möglich, wenn das Vorgänger-aMFM das Nachfolger-aMFM rechtzeitig über eine anstehende Übergabe informiert. Falls das Nachfolger-aMFM frei ist, kann die Vorbereitung rechtzeitig starten, so dass die Vorbereitung abgeschlossen ist, sobald das Vorgänger-aMFM seinen Transport beendet. Je länger die Transportzeit auf dem Vorgänger-aMFM ist, desto weiter im Voraus kann das Vorgänger-aMFM das Nachfolger-aMFM informieren. Die externe Vorbereitungszeit hängt somit von der Konfiguration des aMFS und dem Zeitpunkt der Übergabeankündigung ab. Erfolgt die

Übergabeankündigung erst, wenn die TE am Ausgang des Vorgänger-aMFM bereitsteht, entspricht die externe Vorbereitungszeit des Vorgänger-aMFM der internen Vorbereitungszeit des Nachfolger-aMFM.

Für die Ermittlung der internen Vorbereitungszeit und Bearbeitungszeit erfasst das aMFM fortlaufend die mittleren Zeiten zur Ausführung der LO. Falls eine LO aktiv ist, bevor die zugehörige TE auf dem aMFM ist, ordnet das aMFM den Zeitanteil der internen Vorbereitungszeit zu. Falls sich die TE auf dem aMFM befindet ordnet das aMFM den Zeitanteil der Bearbeitungszeit zu. Liegen noch keine oder zu wenig gemessene Zeiten vor, werden zunächst die theoretischen Ausführungszeiten der LO herangezogen, die in der Wissensbasis hinterlegt sind und auch schon im Konfigurationsprozess verwendet wurden.

Die externe Vorbereitungszeit ermittelt das aMFM gemeinsam mit dem Nachfolger-aMFM. Hierfür teilt das Nachfolger-aMFM dem Vorgänger-aMFM einer Verbindung mit, wie lange die interne Vorbereitungszeit für die Verbindung beträgt. Das Vorgänger-aMFM prüft, ob es eine Übergabe rechtzeitig ankündigen kann, so dass das Nachfolger-aMFM die Vorbereitung beendet, bevor der Transport auf dem Vorgänger-aMFM vollständig abgeschlossen ist. Falls nicht genügend Vorlaufzeit vorhanden ist, gibt es auf dem Vorgänger-aMFM eine externe Vorbereitungszeit, die in der Transport- und Belegzeit berücksichtigt werden muss. Die externe Vorbereitungszeit kann nur mit Informationen vom Vorgänger und Nachfolger-aMFM ermittelt werden. Würde das Vorgänger-aMFM beispielsweise nur die Zeit ermitteln, wie lange eine TE am Ausgang des aMFM auf die Übergabe wartet, ist der Wert für die externe Vorbereitungszeit eventuell durch Verkehrseffekte verfälscht. Beispielsweise entsteht eine Wartezeit, wenn auf dem Nachfolger-aMFM ein Stau auftritt. Diese Arbeit betrachtet die Verkehrseffekte zu einem späteren Zeitpunkt separat.

Ein aMFM berechnet aus den drei Zeitkomponenten interne Vorbereitungszeit, Bearbeitungszeit und externe Vorbereitungszeit die Transport- und Belegzeit für eine Verbindung. Für jede Verbindung berechnet das aMFM eine spezifische Transport- und Belegzeit, da sich die LO-Ketten voneinander unterscheiden. Die Transportzeit  $T_{T,n}$  einer Verbindung  $n$  setzt sich aus der Summe der Bearbeitungszeit  $t_{Bea}$  und der externen Vorbereitungszeit  $t_{exV}$  zusammen (vgl. (7-1)). Die interne Vorbereitungszeit ist nicht berücksichtigt, da sie beim Vorgänger-aMFM in der externen Vorbereitungszeit bereits berücksichtigt ist, falls die Übergabeankündigung nicht rechtzeitig kommt.

$$T_{T,n} = t_{Bea,n} + t_{exV,n} \quad (7-1)$$

Die Belegzeit  $T_{B,n}$  einer Verbindung setzt sich aus der Summe der internen Vorbereitungszeit  $t_{inV}$ , der Bearbeitungszeit und der externen Vorbereitungszeit zusammen (vgl. (7-2)). Das aMFM ist für alle drei Zeitkomponenten belegt, was in der aMFM-Kapazität berücksichtigt werden muss. Es gilt daher die Aussage, dass die kumulierten Belegzeiten auf einer Route größer oder gleich der Gesamttransportzeit sind, da eine TE durch Vorbereitungen zeitgleich mehrere aMFM blockieren kann. Somit wird Anforderung AT6 erfüllt, Vorbereitungszeiten zu berücksichtigen.

$$T_{B,n} = t_{inV,n} + t_{Bea,n} + t_{exV,n} \quad (7-2)$$

### 7.2.3 Verbindungseigenschaft: Taktzeit

Die Taktzeit gibt die Frequenz an, in der ein aMFM TE aufnehmen kann. Besteht ein aMFM nur aus einem Arbeitsraum, kann das aMFM nur eine TE zeitgleich transportieren und die Taktzeit entspricht der Belegzeit des aMFM. Verfügt ein aMFM über mehrere Arbeitsräume, in denen das aMFM mehrere TE gleichzeitig transportiert, ist die Taktzeit kleiner als die Belegzeit. Für die Aufnahme einer neuen TE muss das aMFM nicht warten, bis ein Transport abgeschlossen ist, sondern es reicht, dass der Arbeitsraum für die Übergabe leer ist. Dies ist in Abbildung 7-6 an zwei Beispielen gezeigt.

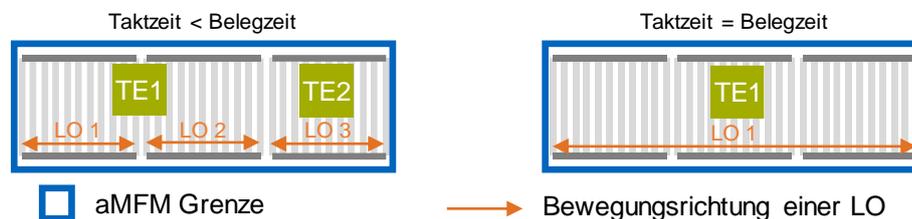


Abbildung 7-6: Beispiel für die Ermittlung der Taktzeit für aMFM mit unterschiedlicher Anzahl an Arbeitsräumen.

Für aMFM mit mehreren Arbeitsräumen lässt sich für jeden Arbeitsraum  $a$  eine Belegzeit  $T_{B,n,a}$  ermitteln, die sich ebenfalls nach (7-2) zusammensetzt. Die Taktzeit  $T_{Ta,n}$  einer Verbindung wird durch die längste Belegzeit aller aufeinanderfolgenden Arbeitsräume einer Verbindung bestimmt (vgl. (7-3)).

$$T_{Ta,n} = \max(\{T_{B,n,1}, \dots, T_{B,n,a}\}) \quad (7-3)$$

Die theoretische Taktzeit  $T_{theoTa}$  ist eine Berechnungsgröße, die für die zukünftige aMFM-Kapazitätsplanung herangezogen wird. Die Taktzeit einer Verbindung kann von der Verteilung der Materialflussströme auf einem aMFM abhängig sein. Stellt ein

aMFM also Berechnungen zur Kapazitätsplanung mit zukünftigen, geänderten Materialflussströmen an, müssen die geänderten Materialflussströme in der zukünftigen Taktzeit berücksichtigt werden. In Abbildung 7-7 ist am Beispiel eines QVW mit zwei unterschiedlichen Verteilungen der Materialflussströme dieser Effekt verdeutlicht. Sowohl bei Verteilung 1 als auch 2 legt der QVW für einen Transport dieselbe Strecke zurück. Allerdings erzielt die Verteilung 2 höhere Durchsätze, da die Option besteht, dass nach Abgabe einer TE der QVW an derselben Position die TE für den nächsten Transport aufnimmt. Bei Verteilung 1 erfolgt nach jeder Abgabe eine Leerfahrt zur Zuführstrecke mit dem nächsten Transport. Je gleichmäßiger der Materialflussstrom bei Verteilung 2 auf die beiden Verbindungen aufgeteilt ist, desto höher ist der Durchsatz des aMFM, da die Wahrscheinlichkeit für eine Leerfahrt sinkt. Der beschriebene Verteilungseffekt der Materialflussströme geht automatisch in die aktuellen Taktzeiten, Transport- und Belegzeiten ein, da er die interne Vorbereitungszeit beeinflusst. Somit ist keine separate Betrachtung des Verteilungseffekts bei den Ist-Zeiten erforderlich.



Abbildung 7-7: Schematische Darstellung von zwei unterschiedlichen Verteilungen der Materialflussströme auf die Verbindungen für ein aMFM vom Typ QVW mit Zu- und Abfuhrstrecken aMFM.

Falls ein aMFM vom Verteilungseffekt betroffen ist, ist in der Wissensbasis eine Berechnungsvorschrift für die theoretische Taktzeit hinterlegt. Das Schema einer solchen Berechnungsvorschrift ist im Folgenden beschrieben:

### Aufstellen der Übergangsmatrix

Die im Folgenden vorgestellte Berechnungsvorschrift gilt nur für das System QVW in Abbildung 7-7, aber lässt sich allgemein auf andere aMFM übertragen. Eine Übergangsmatrix bildet die möglichen Zustände ab, in denen sich ein aMFM vor einem Transport befinden kann. Das Vorgehen zur Ermittlung der möglichen Zustände ist in der aMFM-Wissensbasis hinterlegt, da sich das Vorgehen je nach aMFM Typ unterscheidet. Z. B. ist für ein aMFM vom Typ QVW als Annahme festgelegt, dass sich der QVW vor einem Transport immer an einer Abfuhrstrecke befindet. Im späteren Verlauf der Arbeit liegt der Fokus auf der Koordination von einzelnen Transporten. Hierfür verwendet das aMFS ein Reservierungsverfahren, das für jeden Transport ein Zeitfenster

vorhält. Das Zeitfenster beginnt erst, wenn der Vorgänger-Transport abgeschlossen ist. Somit darf die vereinfachende Annahme getroffen werden, dass zu Beginn des nächsten Transports der QVW immer an einer Abfuhrstrecke stehen muss und sich nicht zwischen zwei Abführstrecken befinden kann. Am Beispiel des QVW aus Abbildung 7-7 ergeben sich somit exakt drei mögliche Positionen (Position 1 bei aMF 1 und 4, Position 2 bei aMF 2 und 5 und Position 3 bei aMF 3 und 6) an denen der QVW steht. Die drei möglichen Positionen sind als Zustände im Übergangsdiagramm in Abbildung 7-8 in den Knoten hinterlegt.

Die Knoten sind mit den Übergangswahrscheinlichkeiten verbunden. Die Übergangswahrscheinlichkeiten geben an, wie hoch die Wahrscheinlichkeit ist von einem Zustand einen anderen Zustand zu erreichen. Steht der QVW nach Abschluss eines Transports an Position 2, muss der QVW für den nächsten Transport mit einer Wahrscheinlichkeit von  $\alpha_{2,2}$  an der aktuellen Position warten, mit  $\alpha_{2,1}$  Position 1 anfahren und mit  $\alpha_{2,3}$  Position 3 anfahren.

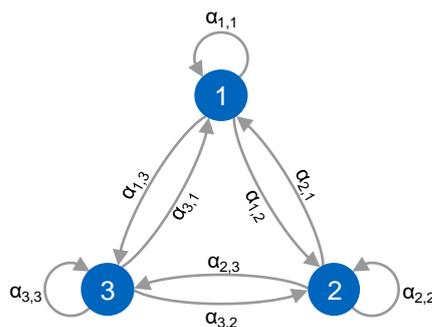


Abbildung 7-8: Abbildung der Zustände des QVW aMF 1 aus Abbildung 7-7 vor einem Transport in einem Übergangsdiagramm mit den Übergangswahrscheinlichkeiten.

Das Übergangsdiagramm lässt sich in eine Übergangsmatrix überführen:

$$\text{Übergangsmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha_{1,1} & \alpha_{1,2} & \alpha_{1,3} \\ \alpha_{2,1} & \alpha_{2,2} & \alpha_{2,3} \\ \alpha_{3,1} & \alpha_{3,2} & \alpha_{3,3} \end{pmatrix} \quad (7-4)$$

Die Übergangswahrscheinlichkeiten ergeben sich aus der Verteilung der Materialflussströme. Hierbei wird angenommen, dass sich der nächste Transport unabhängig von den vorangegangenen Transporten ergibt. Es handelt sich somit um eine diskrete Poisson-Verteilung mit unabhängigen Ereignissen, da nur definierte Zustände auftreten. Die Übergangswahrscheinlichkeiten  $\alpha_{i,j}$  berechnen sich nach (7-5). Mit  $i$  sind die Ausgangszustände (Positionen) durchnummeriert und mit  $j$  der nächste Zustand (Position). Die Berechnung einer Übergangswahrscheinlichkeit ergibt sich aus der Summe der Durchsätze aller ausgehenden Verbindungen einer Position dividiert durch die

Summe der Durchsätze aller Verbindungen auf einem aMFM. Der Durchsatz der Verbindungen wird in dieser Betrachtung mit  $\lambda_{Res,j,i}$  bezeichnet. Die Bezeichnung  $n$  für eine Verbindung wird in dieser Betrachtung durch die detailliertere Beschreibung  $j$  und  $i$  ersetzt ( $n = j,i$ ). Der Index  $j$  steht für die Ursprungsposition und der Index  $i$  für die Zielposition einer Verbindung. Der Index  $P$  bezeichnet die Summe aller Positionen. Steht der QVW z. B. an Position 2 und es wird die Übergangswahrscheinlichkeit  $\alpha_{2,1}$  für den nächsten Zustand Position 1 gesucht, addiert das aMFM alle Verbindungen, die von der Position 1 ( $j = 1, i = \text{Alle Zielpositionen}$ ) in das aMFM QVW eintreten. Dies ergibt die Wahrscheinlichkeit mit der ein QVW an Position 2 die nächste TE an Position 1 abholen muss. Für die theoretische Taktzeit werden die zukünftig reservierten Kapazitäten (zukünftige Verteilung der Materialflusstrome) für die Kapazität der Verbindungen eingesetzt.

$$\alpha_{i,j} = \frac{\sum_{i=1}^P \lambda_{Res,j,i}}{\sum_{j=1}^P \sum_{i=1}^P \lambda_{Res,j,i}} \quad (7-5)$$

### Zukünftige Zeitanteile berechnen

Auf Basis der Übergangsmatrix ist das aMFM in der Lage, die zukünftige theoretische Vorbereitungszeit  $t_{theoinV,j,i}$  für die Verbindung  $j,i$  des QVW zu berechnen. Die Fahrzeiten von einer Position zu einer anderen sind in den vorbereitenden LO  $t_{LOV}$  hinterlegt. Das aMFM gewichtet die Fahrzeiten mit den Übergangswahrscheinlichkeiten und ermittelt somit die durchschnittliche theoretische Vorbereitungszeit einer Verbindung nach (7-6).

$$t_{theoinV,j,i} = \sum_{i=1}^P \alpha_{i,j} t_{LOV,i,j} \quad (7-6)$$

### Theoretische Taktzeit bestimmen

Mit Hilfe der theoretischen Vorbereitungszeit lässt sich unter der Verwendung des Index  $n$  nun nach (7-7) die theoretische Belegzeit  $T_{theoB}$  berechnen. Falls die Bearbeitungszeit ebenfalls vom vorangegangenen Zustand abhängt, berechnet das aMFM die theoretische Bearbeitungszeit  $t_{theoBea}$  analog der theoretischen Vorbereitungszeit. Die theoretische Taktzeit entspricht wiederum der längsten theoretischen Belegzeit der Arbeitsräume auf einer Verbindung.

$$T_{theoTa,n} = T_{theoB,n} = t_{theoinV,n} + t_{theoBea,n} + t_{exV,n} \quad (7-7)$$

Mit den zukünftigen Materialflussströmen ist das aMFM in der Lage verschiedene Planungsszenarien durchzuspielen. Um eine korrekte externe Vorbereitungszeit zu berechnen, muss das nachfolgende aMFM auch die zukünftigen Materialflussströme aller seiner Ein- und Ausgänge erkennen, die sich durch die neuen Materialflussströme des Vorgänger-aMFM ergeben würden. Diese Voraussetzung ist bei größeren aMFS und ohne vollständige Systemkenntnis nicht zu erfüllen, daher kann die zukünftige externe Vorbereitungszeit nicht zuverlässig berechnet werden und das aMFM verwendet die aktuelle externe Vorbereitungszeit.

#### 7.2.4 Verbindungseigenschaft: Maximale und verfügbare Kapazität

Neben den Zeiten stellt die maximale sowie die verfügbare Kapazität einen essenziellen Bestandteil der Verbindungseigenschaften dar.

##### Maximale Kapazität

Die maximale Kapazität einer Verbindung gibt an, wie viele TE pro Zeitperiode eine Verbindung unter optimalen Bedingungen transportieren kann. Optimale Bedingungen liegen vor, wenn auf den anderen Verbindungen keine Transporte stattfinden und keine Wartezeiten durch Verkehrseffekte auftreten. Das aMFM berechnet für diesen Fall die theoretische Taktzeit  $T_{theoTa,n}$  und anschließend nach (7-8) die maximale Kapazität  $\lambda_{Max,n}$  der Verbindung.

$$\lambda_{Max,n} = \frac{1}{T_{theoTa,n}} \quad (7-8)$$

##### Verfügbare Kapazität

Die verfügbare Kapazität  $\lambda_{Ver,n}$  einer betrachteten Verbindung gibt an, wie viele TE pro Zeitperiode das aMFM noch zusätzlich zu den aktuell bereits eingeplanten TE über eine Verbindung transportieren kann. Hierbei gilt die Annahme, dass die gesamte noch verfügbare Nutzungsdauer eines aMFM für die aktuell betrachtete Verbindung  $n$  zur Verfügung steht. Die verfügbare Nutzungsdauer eines aMFM wird als Anteil an einer Zeitperiode ausgedrückt, da sich durch die unterschiedlichen Taktzeiten der Verbindungen keine allgemeingültige aMFM-Kapazität ermitteln lässt. Der Zähler von Formel (7-9) ermittelt zunächst auf Basis der theoretischen Taktzeiten  $T_{theoTa,n}$  die zukünftige Auslastung eines aMFM für die aktuell reservierten Kapazitäten  $\lambda_{Res,n}$  auf einer Verbindung und bestimmt die noch verfügbare Nutzungsdauer. Die verfügbare Nutzungsdauer dividiert durch die theoretische Taktzeit  $T_{theoTa,n}$  der betrachteten Verbindung, ergibt die verfügbare Kapazität.

$$\lambda_{Ver,n} = \frac{1 - \sum_{n=1}^N T_{theoTa,n} \lambda_{Res,n}}{T_{theoTa,n}} \quad (7-9)$$

Für die Berechnung der verfügbaren Kapazität sind also die theoretischen Taktzeiten erforderlich, die sich in Zukunft einstellen. Um die theoretischen Taktzeiten nach (7-7) zu berechnen, fließt in die Gleichung die gesuchte verfügbare Kapazität  $\lambda_{Ver,n}$  ein. Der Index  $n$  bezeichnet die betrachtete Verbindung und die Indizes  $p, q$  stellen wiederum eine detailliertere Bezeichnung dar, analog zu  $j, i$ . Für das Beispiel des QVW gilt für Formel (7-5) nun:

$$\alpha_{i,j} = \begin{cases} \frac{\sum_{i=1}^P \lambda_{Res,j,i}}{\sum_{j=1}^P \sum_{i=1}^P \lambda_{Res,j,i} + \lambda_{Ver,p,q}}, & p \neq j \\ \frac{\sum_{i=1}^P \lambda_{Res,j,i} + \lambda_{Ver,p,q}}{\sum_{j=1}^P \sum_{i=1}^P \lambda_{Res,j,i} + \lambda_{Ver,p,q}}, & p = j \end{cases} \quad (7-10)$$

Wird (7-9) nach  $T_{theoTa,n}$  umgeformt und in (7-7) eingesetzt, ergibt sich (7-11). Im Falle des QVW gilt zusätzlich für  $t_{theoInV}$  (7-6) in Verbindung mit (7-10). Der Entwickler löst für jedes aMFM, das eine individuelle Berechnungsvorschrift zur Ermittlung der theoretischen Taktzeit einsetzt, Gleichung (7-11) nach  $\lambda_{Ver,n}$  auf.

$$\frac{1 - \sum_{n=1}^N T_{theoTa,n} \lambda_{Res,n}}{\lambda_{Ver,n}} = t_{theoBea,n} + t_{theoInV,n} + t_{exV,n} \quad (7-11)$$

Die Lösung der Gleichung (7-11) und Implementierung in die aMFM-Steuerung ist mitunter sehr komplex, wie das Beispiel des QVW zeigt. Ein iteratives Vorgehen führt zu einer Vereinfachung der Lösung. Das aMFM schätzt daher die verfügbare Kapazität zunächst mit der aktuellen Taktzeit  $T_{Ta,n}$ . Mit der geschätzten verfügbaren Kapazität berechnet das aMFM dann die theoretischen Taktzeiten der Verbindungen und berechnet die verfügbare Kapazität nach (7-9). Die größten Veränderungen bei den theoretischen Taktzeiten ergeben sich, wenn die noch verfügbare Kapazität deutlich größer ist als die bereits reservierte Kapazität. In diesem Fall hat eine Veränderung der Verteilung einen großen Einfluss auf die Vorbereitungszeiten, da die maximal verfügbare Kapazität  $\lambda_{Ver,n}$  (im Falle des QVW  $\lambda_{Ver,p,q}$ ) den Nenner in Formel (7-10) in diesem Fall stark beeinflusst. Aber erst je näher ein aMFM an seiner Kapazitätsgrenze arbeitet, desto genauere Ergebnisse benötigt die Materialflussplanung für die maximal verfügbare Kapazität, damit das aMFM nicht zu viel zusätzliche Kapazität einplant. In diesem Fall ist der Einfluss der maximal verfügbaren Kapazität gering ( $\lambda_{Ver,n} \ll \sum \lambda_{Res,n}$ ). Die Evaluation dieser Annahmen wird in Abschnitt 10.3.1 durchgeführt.

### 7.3 Berücksichtigung von gegenläufigen Materialflussströmen

In den vorangegangenen Abschnitten wurde davon ausgegangen, dass ein aMFM seine verfügbare Kapazität und Transportzeit in Abhängigkeit von anderen Transporten auf dem aMFM eigenständig ermitteln kann. Der nachfolgende Abschnitt betrachtet hingegen aMFM-übergreifende Effekte, die einen Einfluss auf die Kapazität und Transportzeit mehrerer aMFM haben. Verlaufen Materialflussströme gegenläufig zueinander über mehrere aMFM hinweg, muss die Kapazitäts- und Routenberechnung dies berücksichtigen. In Abbildung 7-9 ist ein Ausschnitt eines aMFS gezeigt, in dem Materialflussströme über fünf aMFM in teilweise entgegengesetzter Richtungen verlaufen.

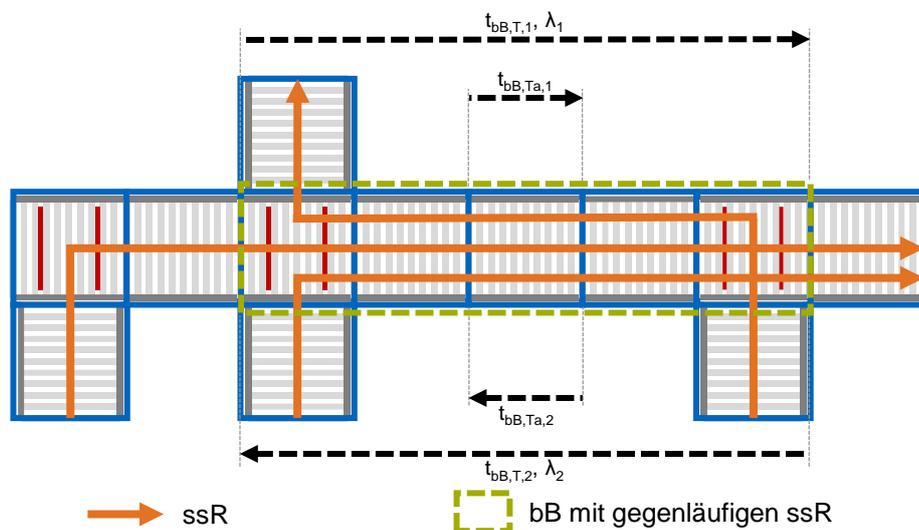


Abbildung 7-9: Bereich eines aMFS mit gegenläufigen ssR und der schematischen Darstellung der Zeit  $t_{bB,T}$  für den Transport durch den bB, der Kapazität  $\lambda$  für eine Richtung und der Taktzeit  $t_{bB,Ta}$ .

Verlaufen zwischen zwei aMFM gegenläufige Materialflussströme, bezeichnet diese Arbeit die Strecke zwischen den beiden aMFM als bidirektionalen Bereich (bB). Die aMFM, zwischen denen ein bB aufgespannt wird, werden als bB-Knoten bezeichnet. In einem bB dürfen sich zur selben Zeit immer nur TE mit derselben Richtung aufhalten, da sich die TE ansonsten gegenseitig blockieren. Wenn ein Transport ansteht, während sich noch eine TE mit gegenläufiger Richtung im bB befindet, muss der Transport der anderen TE abgewartet werden. Im ungünstigsten Fall ist die TE gerade erst in den bB eingetreten und verlässt den Bereich erst nach Ablauf der Transportzeit  $t_{bB,T}$  durch den bB. Die Berechnung der Kapazität und der Transportzeit muss in bB daher zusätzlich die Wartezeit auf gegenläufige Transporte berücksichtigen. bB sind mit einer Ampel vergleichbar, vor der sich der Verkehr bei Rot aufstaut, bis der Querverkehr Rot bekommt und sich der Stau bei Grün abbaut.

### 7.3.1 Berechnung der Kapazität in bB

Die Wartezeit vor einem bB fällt nur bei einem Richtungswechsel eines bB an. Daher bestimmt sich die Kapazität eines bB maßgeblich durch die durchschnittliche Anzahl an direkt aufeinanderfolgenden Transporten in dieselbe Richtung. Direkt aufeinanderfolgende Transporte in dieselbe Richtung werden im Folgenden als Block bezeichnet. Die Dauer für die Abfertigung eines Blocks  $T_{Bl,r}$ , einer Richtung  $r$  ergibt sich nach Formel (7-12).  $N_{Bl}$  steht für die durchschnittliche Blockgröße,  $t_{bB,T}$  gibt die Transportzeit durch den bB an und  $t_{bB,Ta}$  in welchem Takt TE den bB verlassen. Die Taktzeit eines bB bestimmt das aMFM mit der längsten Taktzeit.

$$T_{Bl,r} = (N_{Bl,r} - 1)t_{bB,Ta,r} + t_{bB,T,r} \quad (7-12)$$

Die effektive Belegzeit  $T_{B,eff}$  einer aMFM Verbindung, welche sich aus der tatsächlich vorhandenen Belegzeit und der Wartezeit in einem bB ergibt, berechnet sich nach (7-13). Aus der Gleichung ergibt sich der folgende Zusammenhang: Je größer die Blöcke sind, desto weniger Richtungswechsel fallen an, desto geringer ist die durchschnittliche Wartezeit, desto geringer ist die effektive Belegzeit und desto höher ist die Kapazität des bB. Im Gegenzug steigt aber die maximale Wartezeit für eine TE.

$$T_{B,eff,r} = \frac{(N_{Bl,r} - 1)t_{bB,Ta,r} + t_{bB,T,r}}{N_{Bl,r}} \quad (7-13)$$

### Kapazitätsberechnung von bB

Die aMFM in einem bB sind in der Lage, sowohl die Transportzeit  $t_{bB,T}$  als auch die Taktzeit  $t_{bB,Ta}$  aus den vorhandenen Topologie-Eigenschaften zu ermitteln und zwischen den aMFM eines bB auszutauschen. Bei der Einrichtung einer ssR wird den aMFM der gesamte Verlauf mitgeteilt, so dass die aMFM selbstständig erkennen, ob sie Teil eines bB sind und welche aMFM dem bB angehören.

Die durchschnittliche Blockgröße soll mit Hilfe der Warteschlangentheorie berechnet werden. Durch die Warteschlangentheorie lässt sich berechnen, wie viele TE im Durchschnitt vor einem bB (Bedienprozess) warten, bis der Transport durch den bB startet. Die durchschnittliche Blockgröße entspricht der durchschnittlichen Länge der Warteschlange. Diesem Vorgehen liegt zum einen die Annahme zu Grunde, dass ein bB eine Warteschlange immer in einem Block transportiert. Zum anderen nimmt ein bB während des Transports eines Blocks keine weiteren Transporte in dieselbe Richtung mehr an. Diese Annahme ist auch in der Praxis notwendig, da ansonsten der bB dauerhaft für eine Richtung blockiert ist, wenn während der Abfertigung eines Blockes laufend neue Transporte in dieselbe Richtung eintreffen. Im Falle einer Überlastung

führt der bB somit Transporte in beide Richtungen aus, aber die Warteschlange wächst.

In Abbildung 7-10 ist der bB als Bediensystem modelliert. Eine oder mehrere Quellen speisen das Bediensystem, deren TE an einer der beiden Seiten in den bB eintreten. Der Ankunfts- und Warteprozess verteilt sich auf das aMFS. Es bildet sich somit eine Warteschlange vor dem bB oder die TE eines Blocks treffen direkt hintereinander am bB ein, ohne dass sich eine Warteschlange aufbaut. An welcher Stelle sich eine Warteschlange bildet, bestimmt maßgeblich die Transportkoordination, die im weiteren Verlauf der Arbeit betrachtet wird. Es muss davon ausgegangen werden, dass die Steuerung des Durchsatzes einer ssR nicht bekannt und eine Bestimmung gegebenenfalls erst nach längerer Betriebszeit möglich ist. Daher wird für den Ankunftsprozess eine Exponentialverteilung angenommen, da diese Verteilung bei vielen Materialflussprozessen beobachtet werden kann [Arn-1998, S. 262ff.].

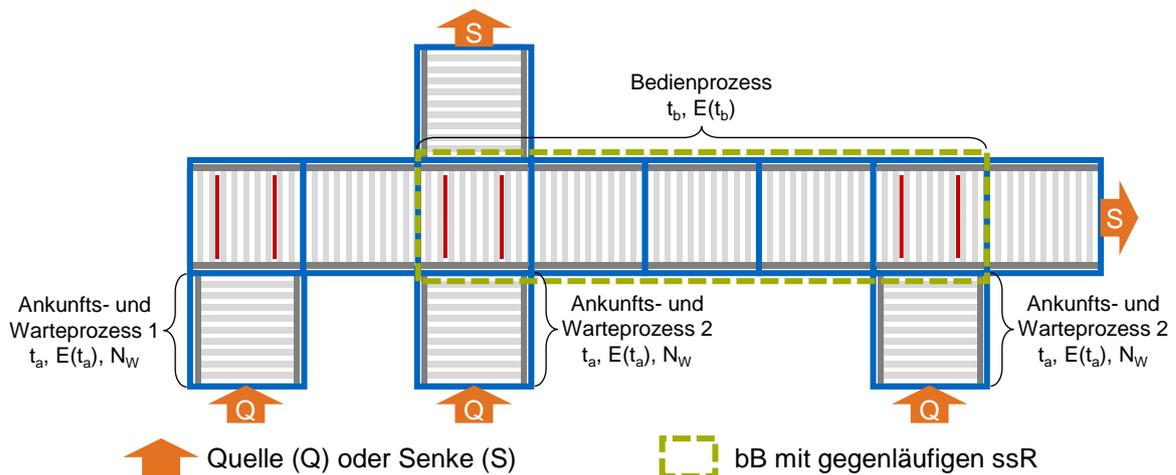


Abbildung 7-10: Modellierung des bB aus Abbildung 7-9 als Bediensystem.

Der Bedienprozess arbeitet mit einer Taktrate, die sich aus der Taktzeit  $t_{bB, T_a}$  und der Dauer der Blockabfertigung für den gegenläufigen Materialflussstrom ergibt. Die Häufigkeitsverteilung für die Bedienzeit des Bedienprozesses besteht aus stetigen und unstetigen Bereichen und entspricht keiner bekannten Verteilungsfunktion. In Abbildung 7-11 sind die verschiedenen Bereiche der Häufigkeitsverteilung dargestellt für eine abschnittsweise definierte Wahrscheinlichkeitsfunktion  $F(t)$ :

- Bereich 1: Abfertigung eines Blocks in gleichläufiger Richtung.
- Bereich 2: Durchführung eines Richtungswechsels.
- Bereich 3: Abfertigung eines Blocks in gegenläufiger Richtung

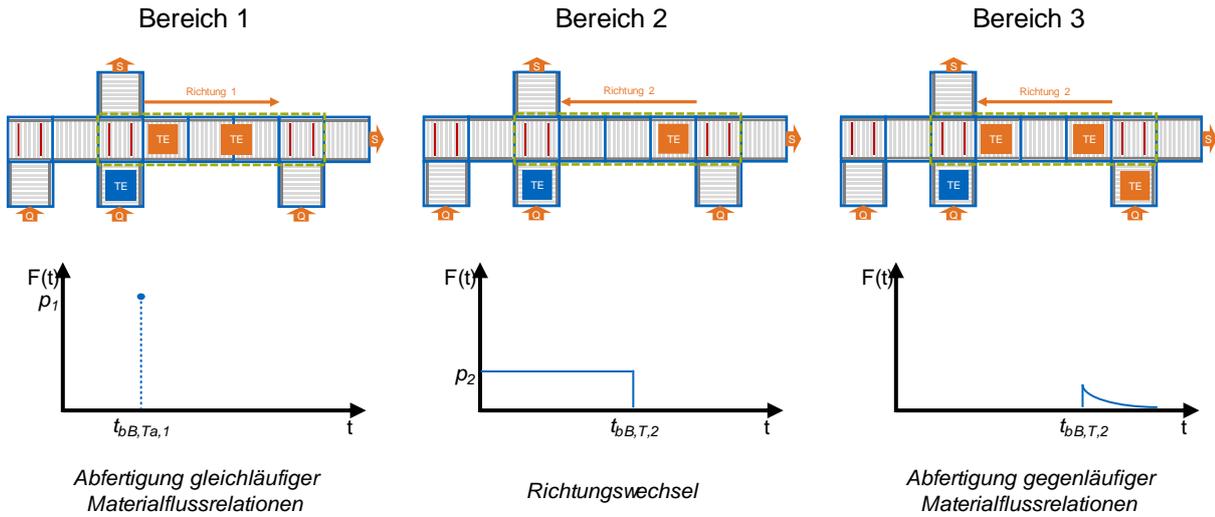


Abbildung 7-11: Verteilungsfunktionen der Bedienzeit für verschiedene Zustände des bB aus Sicht der blau markierten TE mit Transportrichtung 1.

Bei der Abfertigung von gleichläufigen Materialflussströmen (Bereich 1) entspricht die Bedienzeit der Taktzeit  $t_{bB, Ta}$ . Die Wahrscheinlichkeit für den Eintritt von Bereich 1  $p_{B,1}$  berechnet sich nach (7-14) aus der durchschnittlichen Zeit für die Abfertigung eines Blocks mit TE in derselben Richtung. Der Block wird um eine TE reduziert, da die letzte TE bereits zu Bereich 2 zählt. Als normierte Basis dient die Zeit, um einen Block in Richtung 1 und 2 abzufertigen. Dies entspricht einem Abfertigungszyklus in einem bB, der sich stetig wiederholt. Es handelt sich dabei um eine diskrete Funktion, bei der die Wahrscheinlichkeitsdichte  $p_1$  der Wahrscheinlichkeit  $p_{B,1}$  entspricht.

$$p_1 = p_{B,1} = \frac{(N_{BL,1} - 1)t_{bB, Ta,1}}{T_{BL,1} + T_{BL,2}} \quad (7-14)$$

Im Falle eines Richtungswechsels (Bereich 2) tritt im günstigsten Szenario die Situation auf, dass der Richtungswechsel gerade abgeschlossen ist und die Bedienzeit beträgt 0. Im ungünstigsten Szenario ist der Richtungswechsel gerade erst gestartet und die Bedienzeit liegt bei  $t_{bB, T,2}$ . Ebenfalls ist jede Bedienzeit zwischen 0 und  $t_{bB, T,2}$  mit der gleichen Wahrscheinlichkeit möglich. Die Wahrscheinlichkeit für den Eintritt von Bereich 2  $p_{B,2}$  berechnet sich nach (7-15), woraus sich die stetige Wahrscheinlichkeitsdichte  $p_2$  ergibt.

$$p_{B,2} = \frac{t_{bB,T,2}}{T_{Bl,1} + T_{Bl,2}} \quad (7-15)$$

$$p_2 = \frac{p_{B,2}}{t_{bB,T,2}} = \frac{1}{T_{Bl,1} + T_{Bl,2}}$$

Für Bereich 3 führt der bB gerade einen gegenläufigen Transport durch. Im ungünstigsten Fall kommt eine TE an und wird gerade nicht mehr im gleichläufigen Block berücksichtigt. In diesem Fall wartet die TE den Transport in gleichläufiger Richtung  $t_{bB,T,1}$  und die Abfertigung des Blocks in gegenläufiger Richtung  $T_{Bl,2}$  ab. Im günstigsten Fall tritt gerade die letzte TE mit gegenläufiger Richtung in den bB ein und die TE wartet den gegenläufigen Transport ab  $t_{bB,T,2}$ . Die Wahrscheinlichkeit für den Eintritt von Bereich 3  $p_{B,3}$  berechnet sich nach:

$$p_{B,3} = \frac{(N_{Bl,2} - 1)t_{bB,T,2} + t_{bB,T,1}}{T_{Bl,1} + T_{Bl,2}} \quad (7-16)$$

Die Dauer zu Abfertigung des gegenläufigen Blocks  $T_{Bl,2}$  und damit der Bedienzeit hängt von der Blockgröße  $N_{Bl,2}$  ab. Da über die Verteilung der Blockgröße nichts bekannt ist und für den Ankunftsprozess eine Exponentialverteilung angenommen wird, gilt diese Annahme ebenfalls für die Blockgröße und damit die Bedienzeit in Bereich 3. Der Mittelwert für die Exponentialverteilung  $t_{M,3}$  berechnet sich nach (7-17) als Mittelwert der Bedienzeit des günstigsten und ungünstigsten Falls:

$$t_{M,3} = \frac{t_{bB,T,1} + (N_{Bl,2} - 1)t_{bB,T,2}}{2} \quad (7-17)$$

Mit Hilfe der modifizierten Exponentialverteilung (2-6) ergibt sich für Bereich 3 die Wahrscheinlichkeitsfunktion:

$$F(t) = \frac{1}{\tau_P - \tau_0} e^{-\frac{\tau - \tau_0}{\tau_P - \tau_0}} = \frac{p_{B,3}}{\frac{t_{bB,T,1} + (N_{Bl,2} - 1)t_{bB,T,2}}{2} - t_{bB,T,2}} e^{-\frac{t - t_{bB,T,2}}{\frac{t_{bB,T,1} + (N_{Bl,2} - 1)t_{bB,T,2}}{2} - t_{bB,T,2}}} \quad (7-18)$$

In (7-19) ist die abschnittsweise definierte Wahrscheinlichkeitsfunktion  $F(t)$  zusammengefasst:

$$F(t) = \begin{cases} p_1 & , t = t_{bB, Ta, 1} \\ p_2 & , 0 \leq t \leq t_{bB, T, 2} \\ \frac{p_{B, 3}}{\frac{t_{bB, T, 1} + (N_{Bl, 2} - 1)t_{bB, Ta, 2}}{2} - t_{bB, T, 2}} e^{-\frac{t - t_{bB, T, 2}}{\frac{t_{bB, T, 1} + (N_{Bl, 2} - 1)t_{bB, Ta, 2}}{2} - t_{bB, T, 2}}} & , t > t_{bB, T, 2} \end{cases} \quad (7-19)$$

$$F(t) = \begin{cases} \frac{(N_{Bl, 1} - 1)t_{bB, Ta, 1}}{(N_{Bl, 1} - 1)t_{bB, Ta, 1} + t_{bB, T, 1} + (N_{Bl, 2} - 1)t_{bB, Ta, 2} + t_{bB, T, 2}} & , t = t_{bB, Ta, 1} \\ \frac{1}{(N_{Bl, 1} - 1)t_{bB, Ta, 1} + t_{bB, T, 1} + (N_{Bl, 2} - 1)t_{bB, Ta, 2} + t_{bB, T, 2}} & , 0 \leq t \leq t_{bB, T, 2} \\ \frac{(N_{Bl, 2} - 1)t_{bB, Ta, 2} + t_{bB, T, 1}}{\left(\frac{t_{bB, T, 1} + (N_{Bl, 2} - 1)t_{bB, Ta, 2}}{2} - t_{bB, T, 2}\right) \left((N_{Bl, 1} - 1)t_{bB, Ta, 1} + t_{bB, T, 1} + (N_{Bl, 2} - 1)t_{bB, Ta, 2} + t_{bB, T, 2}\right)} e^{-\frac{t - t_{bB, T, 2}}{\frac{t_{bB, T, 1} + (N_{Bl, 2} - 1)t_{bB, Ta, 2}}{2} - t_{bB, T, 2}}} & , t > t_{bB, T, 2} \end{cases}$$

Die Wahrscheinlichkeitsfunktion  $F(t)$  der Bedienzeit entspricht einer sogenannten beliebigen Verteilung und das Bediensystem ist nach der Kendall Notation mit  $M|G|1|FIFO$  charakterisiert. Der Warteprozess eines  $M|G|1|FIFO$  Bediensystems wird mit dem Erwartungswert und der Varianz der beliebigen Verteilung beschrieben, die aus der Wahrscheinlichkeitsfunktion  $F(t)$  abgeleitet werden. Allerdings handelt es sich bei der Wahrscheinlichkeitsfunktion  $F(t)$  um eine rekursive Funktion, da sie von der durchschnittlichen Blockgröße  $N_{Bl, 1}$  als Ergebnis des Warteprozesses abhängt. Die Ermittlung des Erwartungswertes oder der Varianz führt also zu einem Gleichungssystem mit mehreren Unbekannten, das nur mit aufwendigen iterativen Verfahren gelöst werden kann. Daher werden in dieser Arbeit Annahmen getroffen, um die Blockgröße vereinfacht zu bestimmen.

Für eine vereinfachte Berechnung der durchschnittlichen Blockgröße wird die Bedienzeit nicht mehr betrachtet. Es wird nur noch der Zeitraum  $T_{Bl, auf}$  betrachtet, in dem sich ein Block aufbaut. Für den Zeitraum  $T_{Bl, auf}$  wird dann bestimmt, wie viele TE durchschnittlich eintreffen. Der Ankunftsprozess  $E_{Ankunft}(T)$  nimmt wiederum eine Exponentialverteilung an. Durch diese Vereinfachung kann nicht mehr die durchschnittliche Warteschlange im Ankunftsprozess berechnet werden, aber sie lässt einen Rückschluss auf die durchschnittliche Blockgröße zu. Mit den getroffenen Annahmen berechnet sich die durchschnittliche Blockgröße nach:

$$N_{Bl, n} = \frac{T_{Bl, auf, n}}{E_{Ankunft, n}(T)} \quad (7-20)$$

Die durchschnittliche Zeitdauer für den Aufbau eines Blocks setzt sich aus den Zeitannteilen für einen Richtungswechsel, der Abfertigung eines gegenläufigen Blocks und Abbau eines Blocks in die gleiche Richtung zusammen:

$$T_{Bl, auf, 1} = t_{bB, T, 1} + t_{bB, T, 2} + (N_{Bl, 2} - 1) \times t_{bB, Ta, 2} + (N_{Bl, 1} - 1) \times t_{bB, Ta, 1} \quad (7-21)$$

Mit der durchschnittlichen Blockgröße in eine Richtung und dem Durchsatz pro Periode kann ermittelt werden, wie viele Richtungswechsel während der betrachteten Periode stattfinden. Aus der Anzahl der Richtungswechsel und dem Durchsatz pro Periode der anderen Richtung lässt sich wiederum die durchschnittliche Blockgröße der anderen Richtung ermitteln. Der Zusammenhang ist in (7-22) dargestellt. Eingesetzt in (7-20) ergibt sich die Gleichung (7-23).

$$\frac{\lambda_1}{N_{Bl, 1}} = \frac{\lambda_2}{N_{Bl, 2}} \quad (7-22)$$

$$N_{Bl, 1} = \frac{t_{bB, T, 1} + t_{bB, T, 2} + \left( \frac{N_{Bl, 1} \lambda_2}{\lambda_1} - 1 \right) \times t_{bB, Ta, 2} + (N_{Bl, 1} - 1) \times t_{bB, Ta, 1}}{\frac{1}{\lambda_1}} \quad (7-23)$$

$$N_{Bl, 1} = \frac{\lambda_1 (t_{bB, T, 1} + t_{bB, T, 2} - t_{bB, Ta, 1} - t_{bB, Ta, 2})}{1 - \lambda_1 t_{bB, Ta, 1} - \lambda_2 t_{bB, Ta, 2}}$$

In schwach ausgelasteten bB treten Zeiträume auf, in denen kein Transport stattfindet. In diesem Fall liegt die durchschnittliche Blockgröße unter 1. Die Berechnung der effektiven Belegzeit (7-13) führt dann zu physikalisch ungültigen Ergebnissen, da die Taktzeit negativ in die Gleichung eingeht. Zur Berechnung der effektiven Belegzeit gilt daher, dass die durchschnittliche Blockgröße mindestens 1 beträgt. In Tabelle 7-1 ist der Einfluss der verschiedenen Größen auf die durchschnittliche Blockgröße zusammengefasst.

Tabelle 7-1: Qualitative Auswertung der Abhängigkeit der durchschnittlichen Blockgröße für Richtung 1 und 2 von der Ausprägung verschiedener Kriterien.

| Kriterium                                      | Trend | $N_{B, 1}$ | $N_{B, 2}$ |
|--|-------|------------|------------|
| Summe $\lambda_1 + \lambda_2$                  | ↑     | ↑↑         | ↑↑         |
| Verhältnis $\frac{\lambda_1}{\lambda_2}$       | ↑     | ↑↑         | ↓↓         |
| Summe $t_{bB, T, 1} + t_{bB, T, 2}$            | ↑     | ↑↑         | ↑↑         |
| Verhältnis $\frac{t_{bB, T, 1}}{t_{bB, T, 2}}$ | ↑     | ↓↓         | ↓↓         |
| Größe $t_{bB, Ta, 2}$                          | ↑     | ↑          | ↑          |

### Kapazitätsberechnung für verschachtelte bB

Die Zusammenführung und Verzweigung von unterschiedlich langen, gegenläufigen ssR kann durch mehrere aMFM an verschiedenen Stellen erfolgen. Hierdurch entstehen verschachtelte bB, wie in Abbildung 7-12 gezeigt.

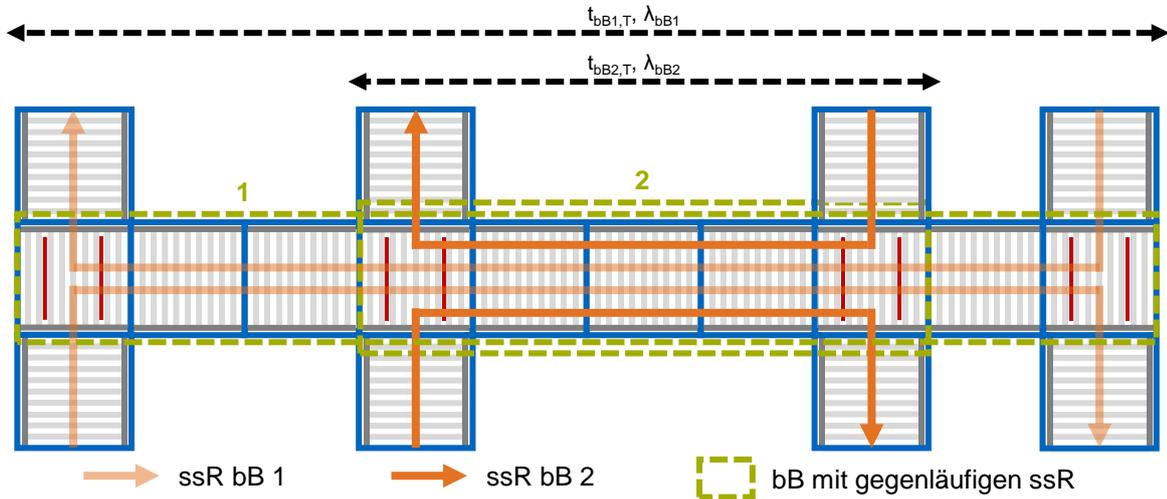


Abbildung 7-12: Verschachtelte bB mit den Transportzeiten  $t_{bB1,T}$  und  $t_{bB2,T}$  durch die bB sowie den kumulierten ssR Kapazitäten  $\lambda_{bB1}$  und  $\lambda_{bB2}$ .

Für jeden bB ergeben sich unterschiedliche Blockgrößen und somit effektive Belegzeiten. Solange in jedem bB die maximale Kapazität nicht überschritten ist, kann der bB die eingeplanten ssR ausführen. Das aMFM berechnet die Auslastung der bB analog zu einem einfachen bidirektionalen Bereich. Allerdings betrachtet das aMFM jeweils nur die ssR, die durch den betrachteten Bereich hindurchführen. Für innere bB wie Bereich 2 stellt der Durchsatz tendenziell die kritische Größe für das Erreichen der maximalen Auslastung dar, da sich hier die ssR der äußeren und inneren bB bündeln. Für äußere bB ist hingegen die Transportzeit durch den bB tendenziell die kritische Größe, da TE eine längere Strecke zurücklegen.

Die Berechnung von äußeren bB ist durch folgendes Vorgehen beschrieben: Die Berechnung des bB 1 berücksichtigt nur ssR, die den bB 1 bilden und somit durch den kompletten Bereich verlaufen. Sowohl kreuzende ssR als auch kürzere ssR, wie die ssR im bB 2, fließen nicht in die Berechnung mit ein. Hier gilt zunächst die Annahme, dass kreuzende oder kürzere ssR Transporte während eines Richtungswechsels im bB 1 ausführen. Diese Annahme gilt insbesondere dann, wenn die Grenzen der bB weit auseinanderliegen (Transportzeit durch den bB 1  $\gg$  Transportzeit durch den bB 2), da hier die Wartezeiten für einen Richtungswechsel sehr lang sind.

Zusammenfassend berechnet ein aMFM also die inneren und äußeren bB unabhängig voneinander. Solange die berechnete Auslastung der inneren und äußeren bB unter

100% liegt, erreicht der verschachtelte bB den geforderten Durchsatz. Diese Annahme wird in den Abschnitten 10.3.2 und 10.3.3 nochmal aufgegriffen und evaluiert.

### 7.3.2 Ermittlung der lokalen aMFM Topologie-Eigenschaften bei gegenläufigen ssR

Die effektive Belegzeit hängt von der Größe des bB ab, der durch die gegenläufigen ssR gebildet wird. Somit ergeben sich die bB in Abhängigkeit der geplanten ssR. Die lokale Topologie stellt eine Datenbasis für die Routenberechnung von neuen ssR zur Verfügung, deren Verlauf im Vorfeld noch nicht bekannt ist. Für die Ermittlung der lokalen Topologie haben daher die bestehenden bB keine Aussagekraft. Ist eine Verbindung eines aMFM aber Teil eines bB, werden auch neue ssR über diese Verbindung Teil desselben oder eines neu gebildeten (kleineren oder größeren) bB. Um diesem Sachverhalt Rechnung zu tragen, soll die verfügbare Kapazität in Abhängigkeit des sich minimal bildenden bB ermittelt werden. In Abbildung 7-13 ist ein bestehender bB 1 eingezeichnet. Für das markierte aMFM in der Mitte ergibt sich der minimale bB 2 in beide Richtungen jeweils bis zum nächsten aMFM, das als Zusammenführung oder Verzweigung agieren kann.

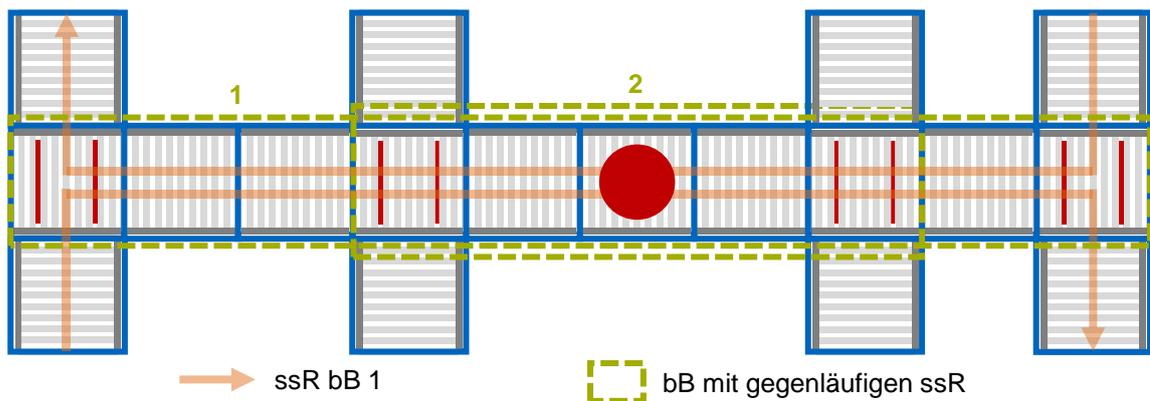


Abbildung 7-13: Bestehender bB 1 mit dem minimalen bB 2, der sich für das markierte aMFM in jedem Fall bei der Einplanung von neuen ssR ergibt.

Für die Auslastung  $T_{bB, Ges}$  eines bB ergibt sich durch die Multiplikation der effektiven Belegzeit mit der reservierten Kapazität einer betrachteten Verbindung 1 und Addition mit der gegenläufigen Verbindung 2 Gleichung (7-24) auf Basis von (7-13). Die Belegzeiten von anderen Verbindungen, die beispielsweise die gegenläufigen Routen auf dem aMFM kreuzen, werden nicht berücksichtigt. Es wird wieder davon ausgegangen, dass nicht betroffene ssR ihre Transporte während der Richtungswechsel durchführen.

$$T_{B,Ges} = \frac{(N_{BL,1} - 1) \times t_{bB,Ta,1} + t_{bB,T,1}}{N_{BL,1}} \lambda_1 + \frac{(N_{BL,2} - 1) \times t_{bB,Ta,2} + t_{bB,T,2}}{N_{BL,2}} \lambda_2 \quad (7-24)$$

Zur Ermittlung der maximal verfügbaren Kapazität einer Verbindung wird  $T_{B,Ges}$  auf 1 normiert und (7-22) und (7-23) eingesetzt. Wird die Gleichung nun nach dem Grenzdurchsatz  $\lambda_{bB,Grenz,1}$  aufgelöst, ergibt sich für das Gleichungssystem die Lösung  $0 = 0$ . Somit besitzt das Gleichungssystem unendlich viele Lösungen. In Abbildung 7-14 ist für einen beispielhaften bB die Auslastung  $T_{B,Ges}$  nach Gleichung (7-24) in Abhängigkeit von  $\lambda_1$  berechnet und im Diagramm links aufgetragen. Im Diagramm rechts ist die nach (7-23) berechnete durchschnittliche Blockgröße aufgetragen. Für kleine  $\lambda_1$  ist der bB zunächst nicht ausgelastet. Ab einem bestimmten Schwellwert besteht eine 100% Auslastung des bB. Die 100% Auslastung hält für einen großen Wertebereich von  $\lambda_1$  an, da die durchschnittliche Blockgröße ebenfalls zunimmt. Nimmt man für Gleichung (7-24) unendliche große Blöcke an, kann  $t_{bB,T}$  vernachlässigt werden und die Taktzeiten  $t_{bB,Ta}$  bestimmen die theoretische Grenzkapazität des bB. Für Kapazitäten über der theoretischen Grenzkapazität, liefern die Gleichungen keine gültigen Lösungen mehr. Aufgrund der theoretischen Grenzkapazität besitzt Gleichung (7-24) unendlich viele Lösungen. Gleichung (7-23) ist somit nicht geeignet die Blockgröße zu bestimmen.

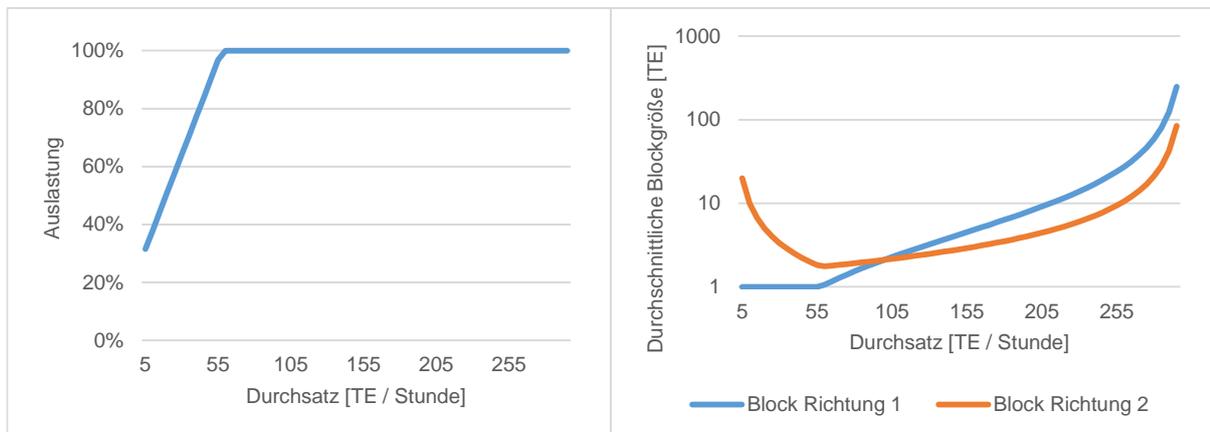


Abbildung 7-14: Für einen beispielhaften bB ( $t_{bB,Ta,1} = t_{bB,Ta,2} = 9$  s,  $t_{bB,T,1} = t_{bB,T,2} = 28$  s,  $\lambda_2 = 100$  TE / Stunde) ist für verschiedene Werte  $\lambda_1$  links der Verlauf der Auslastung nach Formel (7-24) des bB und rechts die durchschnittliche Blockgröße nach Formel (7-23) logarithmisch aufgetragen.

Für die Bestimmung der durchschnittlichen Blockgröße wird angenommen, dass das aMFS Transporte vorausplant. In Kapitel 8 beschäftigt sich diese Arbeit noch einmal ausführlich mit der Transportkoordination. In Abbildung 7-15 sind in der oberen Zeitleiste die erwarteten Ankunftszeitpunkte  $E(t)$  der TE am bB in einem Ankunftsmodell aufgetragen. Im Ankunftsmodell kommt zu Beginn jeweils eine TE für Richtung 1 und 2 gleichzeitig an.

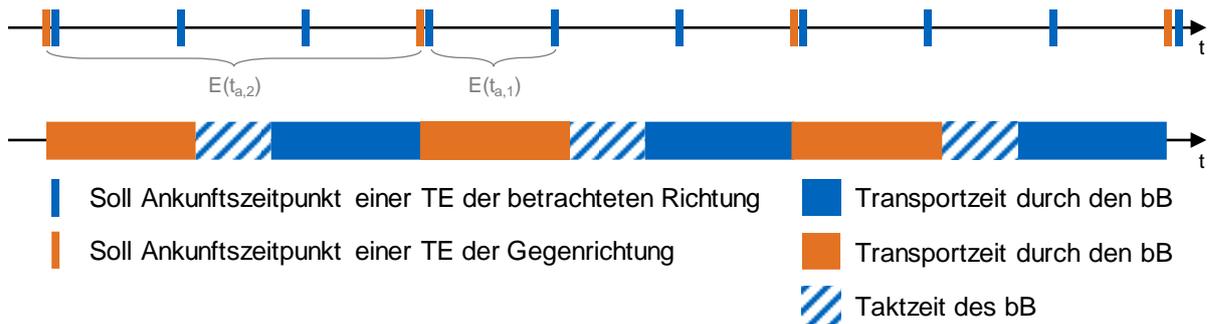


Abbildung 7-15: Ankunftsmodell für einen bB mit Bildung der Blockgrößen.

Das aMFS plant die TE möglichst nah an ihrem Ankunftszeitpunkt ein, so dass der bB nur TE der Richtung 1 mit Ankunftszeitpunkten zwischen zwei TE der Richtung 2 in einem Block zusammenfasst. Dieser Zusammenhang ist in Formel (7-25) beschrieben. Die Anzahl der TE in einem Block  $N_{Bl,1}$  in Richtung 1 setzt sich aus der ersten TE zusammen, addiert mit der durchschnittlichen Anzahl an TE, die bis zur nächsten erwarteten Ankunft einer TE in Richtung 2 ankommen. Hierfür werden die durchschnittlichen Ankunftszeiten  $E(t_{a,1})$  und  $E(t_{a,2})$  dividiert:

$$N_{Bl,1} = 1 + \frac{E(t_{a,2})}{E(t_{a,1})} = 1 + \frac{1}{\frac{\lambda_2}{\lambda_1}} = 1 + \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \quad (7-25)$$

Mit Formel (7-25) kann Gleichung (7-24) nach  $\lambda_1$  aufgelöst werden und mit der Lösungsformel für allgemeine quadratische Gleichungen ergibt sich die Lösung nach (7-26). Die Formel liefert genau eine physikalisch gültige (positive) und somit eindeutige Lösung für  $\lambda_1$ . Die Lösung für  $\lambda_1$  entspricht somit der Grenzkapazität der betrachteten Verbindung.

$$T_{B,Ges} = \frac{(N_{Bl,1} - 1) \times t_{bB,Ta,1} + t_{bB,T,1}}{N_{Bl,1}} \lambda_1 + \frac{(1 + \frac{\lambda_1}{\lambda_2} - 1) \times t_{bB,Ta,2} + t_{bB,T,2}}{1 + \frac{\lambda_1}{\lambda_2}} \lambda_2 \quad (7-26)$$

$$\lambda_{bB,Grenz,1} = \lambda_1 = \frac{-(t_{bB,T,1} + t_{bB,T,2} - \frac{1}{\lambda_2}) \pm \sqrt{(t_{bB,T,1} + t_{bB,T,2} - \frac{1}{\lambda_2})^2 - 4(\frac{t_{bB,Ta,1}}{\lambda_2})(\lambda_2 t_{bB,Ta,2} - 1)}}{2 \frac{t_{bB,Ta,1}}{\lambda_2}}$$

Die bereits reservierte Kapazität wird von der bidirektionalen Grenzkapazität subtrahiert, um die verfügbare bidirektionale Kapazität zu erhalten. Falls die verfügbare bidirektionale Kapazität größer ist als die verfügbare Kapazität einer Verbindung, die sich aus den reservierten Kapazitäten und Belegzeiten der anderen Verbindungen ergibt, wird die verfügbare Kapazität in die lokale Topologie übernommen. Dieser Fall kann

beispielsweise bei einem kurzen bB in Kombination mit einer hohen Kapazität für kreuzende ssR eintreten. Die Berechnung der maximalen Kapazität ist von bB nicht betroffen, da hier von optimalen Bedingungen ausgegangen wird und somit gegenläufige Routen ausgeschlossen sind.

### 7.3.3 Berücksichtigung von gegenläufigen ssR bei der Routenberechnung

Die Routenberechnung zur Ermittlung und Einrichtung von ssR ist auf die aMFM eines aMFS verteilt. Die eingerichteten ssR und deren Verlauf sind lokal auf den beteiligten aMFM hinterlegt und stehen nicht zentral für die Routenberechnung zur Verfügung. Für die Berücksichtigung von gegenläufigen ssR muss daher bei der Routenberechnung auf einem aMFM eine indirekte Ermittlung der bB erfolgen. Haupteinflussfaktoren zur Berechnung der Kapazität von bB sind die Streckenlänge und der Durchsatz. Die Routenberechnung kann sowohl die Streckenlänge als auch den Durchsatz ohne genaue Kenntnis des Verlaufs der ssR nur schätzen. In Abbildung 7-16 ist ein Abschnitt mit unidirektionalen ssR dargestellt. Die Routenberechnung prüft nun, ob es möglich ist eine neue geplante ssR (gestrichelt) durch den Abschnitt zu legen.

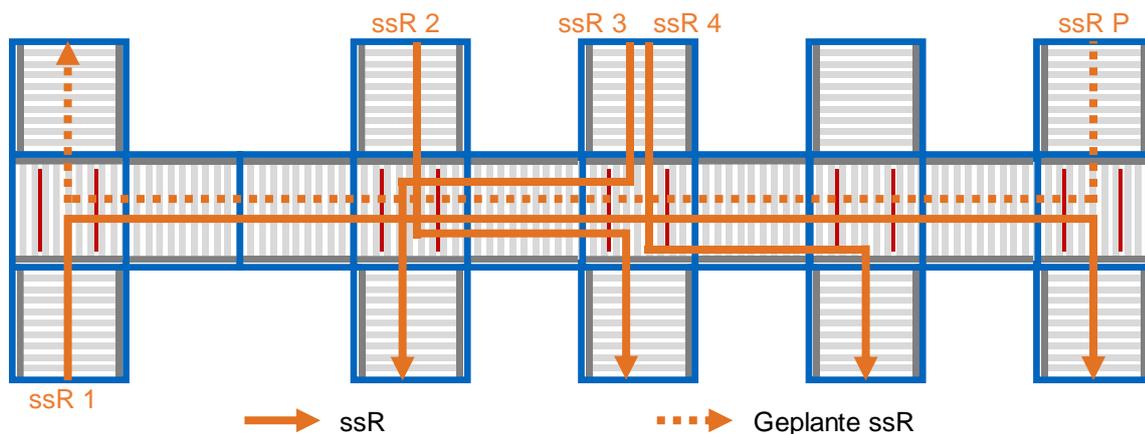


Abbildung 7-16: Beispielhafter Verlauf von ssR in einem bB.

### Über- und Unterschätzen der Kapazität von bB

Die Routenberechnung verfügt über die globale Topologie, aus der die Haupteinflussfaktoren der bB ermittelt werden müssen. Wenn nur die reservierte Kapazität und Richtung aus den Eigenschaften der globalen Topologie bekannt sind, stellt sich der betrachtete Abschnitt nach Abbildung 7-17 dar.

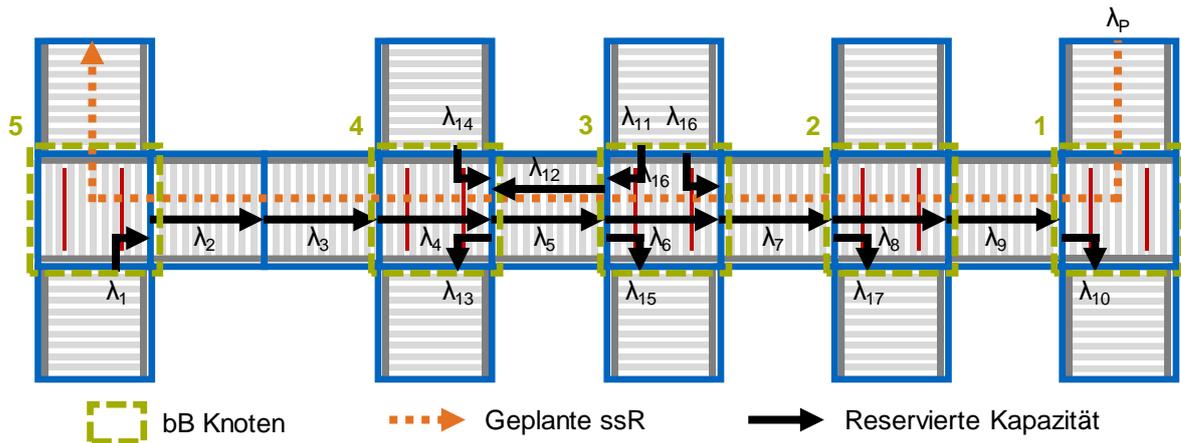


Abbildung 7-17: Betrachtung des Bereichs aus Abbildung 7-16 aus Sicht der globalen Topologie.

In der globalen Topologie setzen sich die Kapazitäten der Verbindung nach Tabelle 7-2 zusammen. Ein Kreuz bedeutet, dass die Kapazität der ssR in die Kapazität der Verbindung miteinfließt. Die Routenberechnung kennt nur die zusammengesetzten Kapazitäten aus der Spalte *Durchsatz*, die in der globalen Topologie hinterlegt sind. Nur die aMFM kennen hingegen den rechten Teil der Tabelle, der beschreibt, wie sich die Kapazität einer Verbindung im Detail zusammensetzt.

Tabelle 7-2: Zusammensetzung der resultierenden Materialflussströme aus Abbildung 7-17.

| Durchsatz                     | ssR1 | ssR2 | ssR3 | ssR4 |
|-------------------------------|------|------|------|------|
| $\lambda_1 - \lambda_4$       | x    |      |      |      |
| $\lambda_5$                   | x    | x    |      |      |
| $\lambda_6$                   | x    |      |      |      |
| $\lambda_7$                   | x    |      |      | x    |
| $\lambda_8 - \lambda_{10}$    | x    |      |      |      |
| $\lambda_{11} - \lambda_{13}$ |      |      | x    |      |
| $\lambda_{14} - \lambda_{15}$ |      | x    |      |      |
| $\lambda_{16} - \lambda_{17}$ |      |      |      | x    |

Ohne genaue Kenntnisse des Verlaufs der bidirektionalen ssR, kann die Routenberechnung die Länge der bB nur schätzen. Sowohl ein Über- als auch Unterschätzen ist dabei möglich. Beim Unterschätzen nimmt die Routenberechnung an, dass gegenläufige ssR kürzest mögliche bB bilden. In diesem Fall tritt eine ssR an einem bB-Knoten ein und würde am nächsten möglichen bB-Knoten wieder austreten. Beim Überschätzen nimmt die Routenberechnung hingegen an, dass gegenläufige ssR längste mögliche bB bilden. Nach dem Eintritt einer ssR in den bB an einem bB-Knoten, tritt eine ssR erst am weitest entfernten bB-Knoten aus.

Durch das Unterschätzen kommt es vor, dass die Routenberechnung ssR einrichtet, die die Kapazität eines bB überschreiten. In diesem Fall lehnen die beteiligten aMFM, die über genauere Kenntnisse der bB verfügen, die ssR ab und lösen eine Neuberechnung aus. Wenn keine Rückkopplung zur Routenberechnung existiert und sich die globale Topologie nicht verändert, ermittelt die Routenberechnung wieder denselben Verlauf. Die Routenberechnung befindet sich also in einer Schleife. Um diese Schleife zu vermeiden, bedarf es entweder einer zusätzlichen Rückkopplung zwischen den beteiligten aMFM oder die Routenberechnung wendet das Überschätzen an, das in dieser Arbeit favorisiert ist.

### Routenberechnung mit Überschätzen von gegenläufigen ssR

Auf Basis der reservierten Kapazitäten lassen sich die Haupteinflussfaktoren nach folgendem Vorgehen bestimmen: In Richtung des Verlaufs der geplanten ssR prüft die Routenberechnung schrittweise auf jedem aMFM, ob das Hinzufügen der neuen ssR die Kapazität überschreitet. Identifiziert die Routenberechnung einen verschachtelten bB, legt sie eine Verschachtelungsmatrix mit allen bB-Knoten an. In Tabelle 7-3 ist für das Beispiel in diesem Abschnitt die Verschachtelungsmatrix für die ssR gezeigt, die gegenläufig zur geplanten ssR verlaufen. In der Verschachtelungsmatrix ist jeweils links die Summe der Zu- und Abgänge am bB-Knoten eingetragen.

Tabelle 7-3: Verschachtelungsmatrix zur Darstellung der gegenläufigen ssR für einen verschachtelten bB aus Abbildung 7-17.

|       | Zu             | Ab             | aMFM1  | aMFM2  | aMFM3  | aMFM4 | aMFM5 |
|-------|----------------|----------------|--|--|--|-------|-------|
| aMFM1 | 0              | $\lambda_{10}$ |  |  |  |       |       |
| aMFM2 | 0              | $\lambda_{17}$ | $+\lambda_{10}$                              |  |  |       |       |
| aMFM3 | $\lambda_{16}$ | $\lambda_{15}$ | $\lambda_{10}$                               | $+\lambda_{17}$                              |  |       |       |
| aMFM4 | $\lambda_{14}$ | 0              | $\lambda_{10} - \lambda_{16}$                | $\lambda_{17} - \lambda_{16}$                | $\lambda_{15} - \lambda_{16}$                |       |       |
| aMFM5 | $\lambda_1$    | 0              | $\lambda_{10} - \lambda_{16} - \lambda_{14}$ | $\lambda_{17} - \lambda_{16} - \lambda_{14}$ | $\lambda_{15} - \lambda_{16} - \lambda_{14}$ |       |       |

Anschließend befüllt die Routenberechnung die Matrix zeilenweise von oben nach unten. Für den betrachteten bB-Knoten in einer Zeile wird geprüft, ob am Vorgänger (eine Zeile oberhalb) ein Zu- oder Abgang erfolgt. Abgänge werden in der Spalte des bB Vorgänger Knotens addiert, da die Routenberechnung den Bereich rückwärts zu den gegenläufigen ssR durchgeht. Im vorliegenden Beispiel bedeutet das, dass der Zugang an aMFM1 in der Zeile des Nachfolgers aMFM2 in Spalte aMFM1 vermerkt ist. Zugänge werden in der Spalte des bB-Knotens analog subtrahiert. Ist der Zellwert bereits null oder der Zugang größer als der Zellwert, wird der Rest beim nächstgelegenen bB-Knoten abgezogen (eine Spalte nach links). Durch dieses Vorgehen bleiben oben hinzugefügte Einträge möglichst weit bis nach unten bestehen. In der Zeile des aMFM5

lässt sich nun ablesen, dass von *aMFM5* bis zum *aMFM1* ein *bB* besteht. Für *ssR*, die in die gleiche Richtung wie die geplante *ssR* verlaufen, wird eine separate Verschachtelungsmatrix erstellt (vgl. Tabelle 7-4). Diese weist den Unterschied auf, dass hier Zugänge addiert und Abgänge subtrahiert werden.

Tabelle 7-4: Verschachtelungsmatrix zur Darstellung der gleichläufigen Materialflussströmen für einen verschachtelten *bB* aus Abbildung 7-17.

|       | Zu             | Ab             | aMFM1                      | aMFM2 | aMFM3                         | aMFM4 | aMFM5 |
|-------|----------------|----------------|----------------------------|-------|-------------------------------|-------|-------|
| aMFM1 | $\lambda_p$    | 0              |                            |       |                               |       |       |
| aMFM2 | 0              | 0              | $+\lambda_p$               |       |                               |       |       |
| aMFM3 | $\lambda_{11}$ | 0              | $\lambda_p$                |       |                               |       |       |
| aMFM4 | 0              | $\lambda_{13}$ | $\lambda_p$                |       | $+\lambda_{11}$               |       |       |
| aMFM5 | 0              | $\lambda_p$    | $\lambda_p - \lambda_{13}$ |       | $\lambda_{11} - \lambda_{13}$ |       |       |

Mit den beiden Verschachtelungsmatrizen ermittelt die Routenberechnung die Kapazitäten und Länge der *bB*. Für *aMFM3* ist in Tabelle 7-5 beispielhaft das Vorgehen skizziert. Um zu ermitteln, ob es einen *bB* zwischen zwei *bB*-Knoten gibt, werden die Zellwerte bis zur Spalte des gesuchten *bB*-Knotens addiert. Beispielsweise existiert ein *bB* zwischen *aMFM3* und *aMFM2* mit der entgegengesetzten Kapazität  $\lambda_{10} + \lambda_{17}$  und zwischen *aMFM3* und *aMFM1* mit der entgegengesetzten Kapazität  $\lambda_{10}$ . Zusammen mit der Kapazität in die gleiche Richtung und den Transportzeiten zwischen den *bB*-Knoten, berechnet sich die *bB*. Für jeden *bB* prüft die Routenberechnung die Einhaltung der maximalen Kapazität und plant eine *ssR* bei erfolgreicher Prüfung ein.

Tabelle 7-5: Beispiel für das Ermitteln der Länge und des Durchsatzes für einen *bB*.

|       | Zu             | Ab             | aMFM1  | aMFM2  | aMFM3  | aMFM4 | aMFM5 |
|-------|----------------|----------------|--|--|--|-------|-------|
| aMFM1 | 0              | $\lambda_{10}$ |  |  |  |       |       |
| aMFM2 | 0              | $\lambda_{17}$ | $+\lambda_{10}$                              |  |  |       |       |
| aMFM3 | $\lambda_{16}$ | $\lambda_{15}$ | $\lambda_{10}$                               | $+\lambda_{17}$                              |  |       |       |
| aMFM4 | $\lambda_{14}$ | 0              | $\lambda_{10} - \lambda_{16}$                | $\lambda_{17} - \lambda_{16}$                | $\lambda_{15} - \lambda_{16}$                |       |       |
| aMFM5 | $\lambda_1$    | 0              | $\lambda_{10} - \lambda_{16} - \lambda_{14}$ | $\lambda_{17} - \lambda_{16} - \lambda_{14}$ | $\lambda_{15} - \lambda_{16} - \lambda_{14}$ |       |       |

Eine Verschachtelungsmatrix, die nach dem Prinzip des Überschätzens aufgebaut ist, bildet die real auftretenden *bB* nicht korrekt ab, wenn sich die reservierte Kapazität aus mehreren *ssR* zusammensetzt. Solch ein Beispiel ist in Abbildung 7-18 gezeigt, in dem *ssR2* und *ssR3* an verschiedenen Punkten in den *bB* ein- und austreten und bereichsweise über dieselben *aMFM* verlaufen. Ist der Durchsatz der *ssR2* kleiner oder gleich *ssR3* tritt der folgende Fall auf. Für die Verschachtelungsmatrix wird angenommen,

dass ein Materialflussstrom bei *aMFM3* eintritt und bei *aMFM2* ganz oder teilweise wieder austritt. Wohingegen der Materialflussstrom von *aMFM4* erst bei *aMFM1* wieder ganz austritt. In diesem Fall ergeben sich deutlich längere *bB* als in der Realität, wodurch es zum Überschätzen kommt.

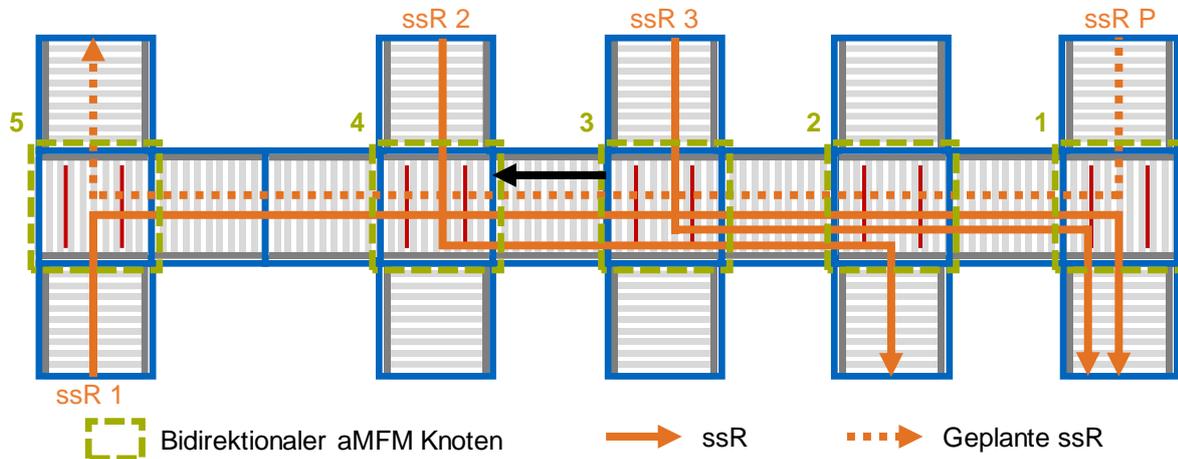


Abbildung 7-18: Beispielhafter Verlauf von *ssR* in einem *bB*.

Durch das Vermischen von unterschiedlichen *ssR*, die an unterschiedlichen Stellen in *bB* ein- und austreten, kann es in der Folge zu einem Überschätzen der beanspruchten Kapazität eines *bB* kommen. Falls keine Vermischung von *ssR* auftreten oder *ssR* sich umschließen (beispielsweise umschließt *ssR1* die *ssR2* und *ssR4* in Abbildung 7-16), bildet die Verschachtelungsmatrix mit Überschätzen einen *bB* exakt ab. Die in diesem Abschnitt vorgestellten Identifikations- und Berechnungsverfahren für einfache und verschachtelte *bB* versetzen *aMFM* in die Lage, *aMFM*-übergreifende Abhängigkeiten zwischen Transporten in die Routenberechnung mit einzubeziehen.

## 8 Routenberechnung und Transportkoordination

---

Das vorangegangene Kapitel beschäftigte sich zum einen mit der Auswahl eines geeigneten Routingverfahrens für aMFS. Zum anderen stand die Ermittlung der Transporteigenschaften von Verbindungen im Fokus. Die Transporteigenschaften einer Verbindung hängen sowohl lokal von den Transporten und Eigenschaften eines aMFM ab als auch global von aMFM-übergreifenden Abhängigkeiten zwischen Transporten. Sowohl für die lokalen als auch die globalen Abhängigkeiten wurden Berechnungsansätze vorgestellt, die unter anderem die Berechnung der verfügbaren Kapazität eines aMFM erlauben.

Auf Basis der Berechnungsansätze für die Eigenschaften von Verbindungen steht in diesem Kapitel nun die Berechnung von Routen im Fokus, um ssR in einem aMFS einzurichten. Vor der Routenberechnung steht zunächst die Ermittlung der geforderten Kapazität an. Anschließend ermittelt die Routenberechnung eine Route durch das aMFS, die mit der geforderten Kapazität die verfügbaren Kapazitäten der aMFM nicht überschreitet. Das aMFS soll auch in der Lage sein, bereits bestehende ssR zu optimieren. Ein Vorgehen zur Optimierung von bestehenden ssR wird daher exemplarisch beschrieben. Nach der Einrichtung von ssR beginnt die Ausführung von Transportaufträgen. Daher schließen ein Konzept zur Einplanung und Koordination von Transportaufträgen das Kapitel ab, dessen grundsätzliche Funktionsweise bereits in [Lie-2018a] vorgestellt wurde.

### 8.1 Bestimmung von Materialflussrelationen

Materialflussrelationen beschreiben die Eigenschaften des Materialflussstromes wie z. B. das Transportvolumen, die Schwankung oder die Art der Transportgüter. Die Materialflussströme eines aMFS umfassen alle Materialflussrelationen von allen Quellen zu allen Senken und stehen somit für den Verkehr in einem aMFS. Substantielle Änderungen wie z. B. der Umbau eines aMFS oder die Zuweisung eines neuen Einsatzzwecks erfolgen nicht in kurzfristigen Abständen, wohingegen sich die Materialflussströme auch untertäglich ändern. Die Topologie und der Einsatzzweck bleiben untertäglich meist konstant und bilden die Basis für stabile Materialflussströme. Allerdings beeinflussen weitere Faktoren die Stabilität von Materialflussströmen wie z. B. die Zusammensetzung der Transportaufträge oder zeitlich bedingte Schwankungen. Die Zusammensetzung der Transportaufträge stellt einen stochastischen Einflussfaktor dar und hängt von diversen Faktoren ab. Beispielhaft sind hier das Bestellverhalten der

Kunden oder schwankende Auftragszeiten an den angebundenen Arbeitsstationen (z. B. Fertigungsmaschinen) zu nennen. Zeitlich bedingte Schwankungen kommen zum Tragen, wenn z. B. eine oder mehrere Quellen an einen Wareneingang gekoppelt sind. Erfolgt die Anlieferung überwiegend am Morgen, treten ab mittags andere Materialflussströme auf. Dies gilt auch für unterschiedliche Betriebszeiten von Arbeitsstationen, die an das aMFS angeschlossen sind. Aufgrund der diversen Einflussfaktoren, die sich teilweise gegenseitig ausgleichen, bilden sich in einem aMFS im gesamten System oder zumindest in Teilen im Mittel stabile Materialflussrelationen. Auf Basis der gemittelten stabilen Materialflussströme bestimmt und optimiert die Routenberechnung ssR. Für instabile Materialflussrelation stehen temporäre ssR zur Verfügung, die sich nach kurzer Zeit wieder auflösen.

Das aMFS kennt die Materialflussrelationen entweder vorab oder ermittelt sie aus Vergangenheitsdaten. Vorab bekannte Materialflussrelationen liegen vor, wenn Prognosedaten vorliegen. Dies ist der Fall, wenn übergeordneten Systeme Transportaufträge mit einem ausreichend langen Vorschauzeitraum übermitteln. Die Länge des Vorschauzeitraums für eine valide Prognose hängt von verschiedenen Faktoren ab wie dem Transportvolumen oder der Schwankung. Je geringer das Transportvolumen ist und je stärker das Transportvolumen über die Zeit schwankt, desto länger muss der Vorschauzeitraum für die Erstellung einer validen Prognose sein. Liegen keine oder nur unzureichende Prognosedaten vor, greift das aMFS auf Vergangenheitsdaten zurück. Zu diesem Zweck halten die Quellen Transportdaten aus der Vergangenheit vor. Es gilt die Annahme, dass sich im Mittel stabile Materialflussströme einstellen. Dies schließt aber nicht aus, dass sich Materialflussrelationen auch ändern, wenn beispielsweise über einen längeren Zeitraum das Transportvolumen steigt oder sinkt. Um auch bei stark schwankenden Transportvolumen einen stabilen Mittelwert zu bestimmen und maßgebliche Veränderungen frühzeitig zu berücksichtigen, empfiehlt sich der Einsatz der exponentiellen Glättung 1. Ordnung [Gud-2011, S. 262f.]. Die exponentielle Glättung erstellt auf Basis von Vergangenheitsdaten eine Prognose, wobei aktuellere Daten ein höheres Gewicht als ältere Daten erhalten. Liegen lineare oder polynomiale Trends (periodische Schwankungen) vor, stehen weitere Verfahren zur Bestimmung eines Prognosewertes zur Verfügung. Diese Verfahren sind aber meist komplexer und benötigen eine größere Datenbasis als die exponentielle Glättung 1. Ordnung. Lineare Trends treten nur für eine begrenzte Zeit in einem aMFS auf. Das Transportvolumen kann einen minimalen Wert von 0 und einen maximalen Wert von der maximal verfügbaren Kapazität für eine Route annehmen. Somit ist jeder lineare Trend endlich und es besteht keine Notwendigkeit zusätzliche Verfahren einzusetzen, die eine bessere Prognose für einen linearen Trend liefern als die exponentielle Glättung 1. Ordnung. Polynomiale Trends treten in aMFS beispielsweise auf, wenn für verschiedene Bereiche eines aMFS unterschiedliche Betriebszeiten vorliegen [Mer-2005, S. 14ff.]. Anstatt

auf umfangreiche Vergangenheitsdaten zurückzugreifen, bietet sich hier die Möglichkeit an, für ausgewählte Zeiträume (z. B. Uhrzeit, Wochentag, etc.) repräsentative Materialflussrelationen oder ssR zu hinterlegen.

Stehen weder Vergangenheits- noch Prognosedaten zur Verfügung, bestimmt das aMFS Ersatzmaterialflussrelationen. Ersatzmaterialflussrelationen ist ein geringer geforderter Durchsatz zugewiesen, so dass die Routenberechnung zunächst ssR mit einem minimalen Einfluss auf die bestehenden ssR ermittelt. Sobald ausreichend Daten über abgeschlossene Transportaufträge zur Verfügung stehen, passt das aMFS die Prognose und die ssR an. ssR sollen die zukünftigen Materialflussströme koordinieren. Daher bilden Materialflussrelationen auf Basis von Prognosedaten die verlässlichste Ausgangsbasis für die Ermittlung von ssR, gefolgt von Materialflussrelationen auf Basis von Vergangenheitsdaten. Die geringste Güte besitzen Ersatzmaterialflussrelationen, da hier keinerlei Daten vorliegen. Die Zusammenhänge sind in Abbildung 8-1 dargestellt.

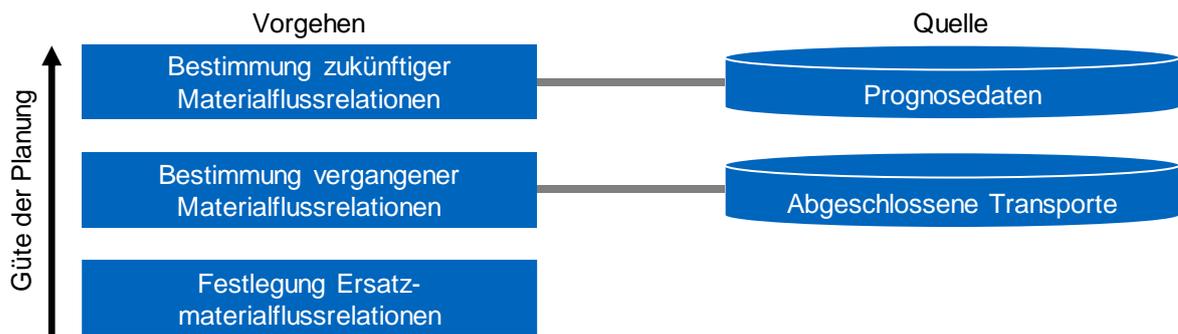


Abbildung 8-1: Vorgehensweisen zur Bestimmung von Materialflussrelationen und Bewertung der Güte.

## 8.2 Routenberechnung von ssR

MPLS richtet LSP entweder statisch oder automatisch ein. Um direkt auf Veränderungen im aMFS zu reagieren, steht zunächst die automatische Einrichtung im Fokus dieser Arbeit. In aMFS erhält jede Materialflussrelation eine eigene ssR, da ausschließlich auf das Verfahren der ssR gesetzt wird. Alle TE einer Materialflussrelation wählen anschließend dieselbe ssR aus. Die Berechnung der ssR ist an jeder Stelle möglich, an der die globale Topologie vorliegt wie z. B. am Koordinator. Die Bündelung aller Routenberechnungen am Koordinator führt dazu, dass sich der Koordinator zu einem potenziellen Engpass in Bezug auf Rechenleistung entwickelt und die Skalierbarkeit beschränkt. Aus diesem Grund streben aMFS eine Verteilung der Routenberechnung auf mehrere aMFM an. Die Routenberechnung unterteilt sich in die Aufgabe der initialen Berechnung und Optimierung. aMFS stoßen die initiale Routenberechnung an, wenn

eine Materialflussrelation neu im aMFS auftritt oder die ursprünglich eingerichtete ssR nicht mehr existiert. Die Optimierung umfasst hingegen die Identifikation von Optimierungspotential sowie den Anstoß von ssR Neuberechnungen und Anpassungen von ssR Eigenschaften. Zunächst steht die initiale Einrichtung von ssR im Fokus.

In Tabelle 8-1 sind die verschiedenen Möglichkeiten bewertet, an welcher Stelle ein aMFS die initiale Routenberechnung durchführen kann. Die Routenberechnung wird entweder durch das aMFM durchgeführt an dem die ssR starten soll, an dem die ssR enden soll, auf einem beliebigen aMFM im aMFS oder am Koordinator-aMFM. Das Start-aMFM verfügt über den Vorteil, dass ein Transportbedarf und ein sich daraus ergebender Bedarf nach einer neuen ssR direkt am aMFM erkannt wird. Falls das Start-aMFM ausfällt, ist es ohnehin nicht mehr relevant, dass auch die Routenberechnung nicht mehr funktioniert. Auch die Skalierbarkeit der Routenberechnung ist bei der Routenberechnung durch das Start-aMFM sichergestellt. Die Berechnung einer neuen ssR ist nur erforderlich, wenn eine neue Materialflussrelation auftritt. Dies kommt beim Start eines komplett neu zusammengestellten aMFS häufig vor. Im ungünstigsten Fall erfordert jede TE eine neue ssR. Im weiteren Betrieb kann das aMFM immer öfter auf bestehende ssR zurückgreifen. Die Dauer der Rechen- und Transportzeit unterscheiden sich um Faktoren. Beispielsweise benötigt eine zentrale SPS für die Berechnung eines kompletten aMFS deutlich unter 1 Sekunde je Zyklus während der Transport auf einem aMFM in der Regel deutlich länger als 1 Sekunde benötigt. Die maximale Anzahl an Routenberechnungen ergibt sich aus dem maximalen Durchsatz eines aMFM.

Tabelle 8-1: *Vergleich und Bewertung für verschiedene Möglichkeiten an welcher Stelle die initiale Routenberechnung durchgeführt wird.*

|                               | aMFM        |           |       |      |
|-------------------------------|-------------|-----------|-------|------|
|                               | Koordinator | Sonstiges | Start | Ziel |
| <b>Skalierbarkeit</b>         | -           | +         | +     | +    |
| <b>Auswahlverfahren</b>       | +           | -         | +     | +    |
| <b>Erkennung Routenbedarf</b> | +/-         | -         | +     | +/-  |
| <b>Rechenleistung</b>         | +           | +         | -     | -    |

Grundlage für die Berechnung von ssR bilden die Kapazität und die Transportzeit analog zur Bandbreite und den Kosten einer LSP in Telekommunikationsnetzwerken. ssR sollen die Materialflussströme gleichmäßig im aMFS verteilen und neben der Transportzeit auch die Kapazität bei der Routenberechnung berücksichtigen. Zur Berücksichtigung von zwei Kriterien bei der Routenberechnung, greift MPLS auf CSPF auf Basis des Dijkstra Algorithmus zurück. Mit CSPF ignoriert der Dijkstra Algorithmus alle

Verbindungen, die nicht über ausreichend verfügbare Kapazität verfügen. In der Folge vermeidet die Routenberechnung dauerhafte Überlastungen an aMFM. Temporäre Überlastungen treten auf, falls mehrere ssR zum selben Zeitpunkt einen Transport einplanen. Die verfügbare Kapazität gibt nur an, wie viele Transporte ein aMFM im Mittel über eine Zeitperiode durchführen kann. Die Vermeidung von kurzfristigen Überlastungen ist unter anderem Thema in Abschnitt 8.4.

Abbildung 8-2 veranschaulicht das Vorgehen zur Ermittlung einer ssR. Zu Beginn einer Routenberechnung fordert das aMFM vom Koordinator-aMFM eine Aktualisierung der globalen Topologie an und berechnet zunächst die schnellste Route mit einer geforderten Kapazität von 0. Falls die Routenberechnung kein Ergebnis liefert, tritt Ausnahmefall 1 ein. Im Ausnahmefall 1 kann der Transport nicht durchgeführt werden und es ist ein manueller Eingriff erforderlich. Um das aMFS in diesem Fall aber nicht zu blockieren, kommen wie in konventionellen aMFS sogenannte *Default* Senken zum Einsatz. Im Ausnahmefall 1 initiiert das Start-aMFM einen Transport zu einer vorher definierten *Default* Senke. Die *Default* Senke schleust die TE mit unerreichbarem Ziel-aMFM aus dem aMFS aus und ein Bediener prüft und bearbeitet die TE manuell.

Im nächsten Schritt ermittelt die Routenberechnung eine Route mit ausreichend maximaler Kapazität und einer geforderten Kapazität von 0. Im Dijkstra Algorithmus ist hierfür die maximale Kapazität ebenfalls als optionale Restriktion vorgesehen. Falls die Routenberechnung für diesen Fall keine gültige Route ermittelt, tritt Ausnahmefall 2 ein. Im Ausnahmefall 2 sind sämtliche Routen zum Ziel nicht in der Lage, auch unter optimalen Bedingungen die geforderte Kapazität zu bewältigen. Ausnahmefall 2 ermittelt daher die Route mit der maximal möglichen Kapazität zum Ziel und setzt die geforderte Kapazität hiermit gleich.

Im nächsten Schritt versucht die Routenberechnung die kürzeste Route mit ausreichend verfügbarer Kapazität zu ermitteln. Falls die Berechnung eine gültige Route liefert, stößt die Routenberechnung die Einrichtung der ssR an, ansonsten tritt Ausnahmefall 3 ein. In Ausnahmefall 3 ist das aMFS zwar technisch in der Lage die Materialflussrelation zu bewältigen, allerdings ist die aktuelle Konfiguration der ssR nicht möglich. Folglich ist eine Optimierung und damit Umplanung der bereits eingeplanten ssR erforderlich. Dies erfolgt in der zweiten Stufe der Routenberechnung, die unter anderem aus Gründen der Skalierbarkeit unabhängig von der initialen Routenberechnung läuft. Die Optimierung und Umplanung von bestehenden ssR benötigt Zeit. Um den Optimierungsprozess anzustoßen und eine kurze Reaktionszeit bei der initialen Routenberechnung zu ermöglichen, richtet die Routenberechnung daher zunächst eine temporäre ssR ein, auch wenn diese die verfügbare Kapazität überschreitet, und wartet die Optimierung ab.

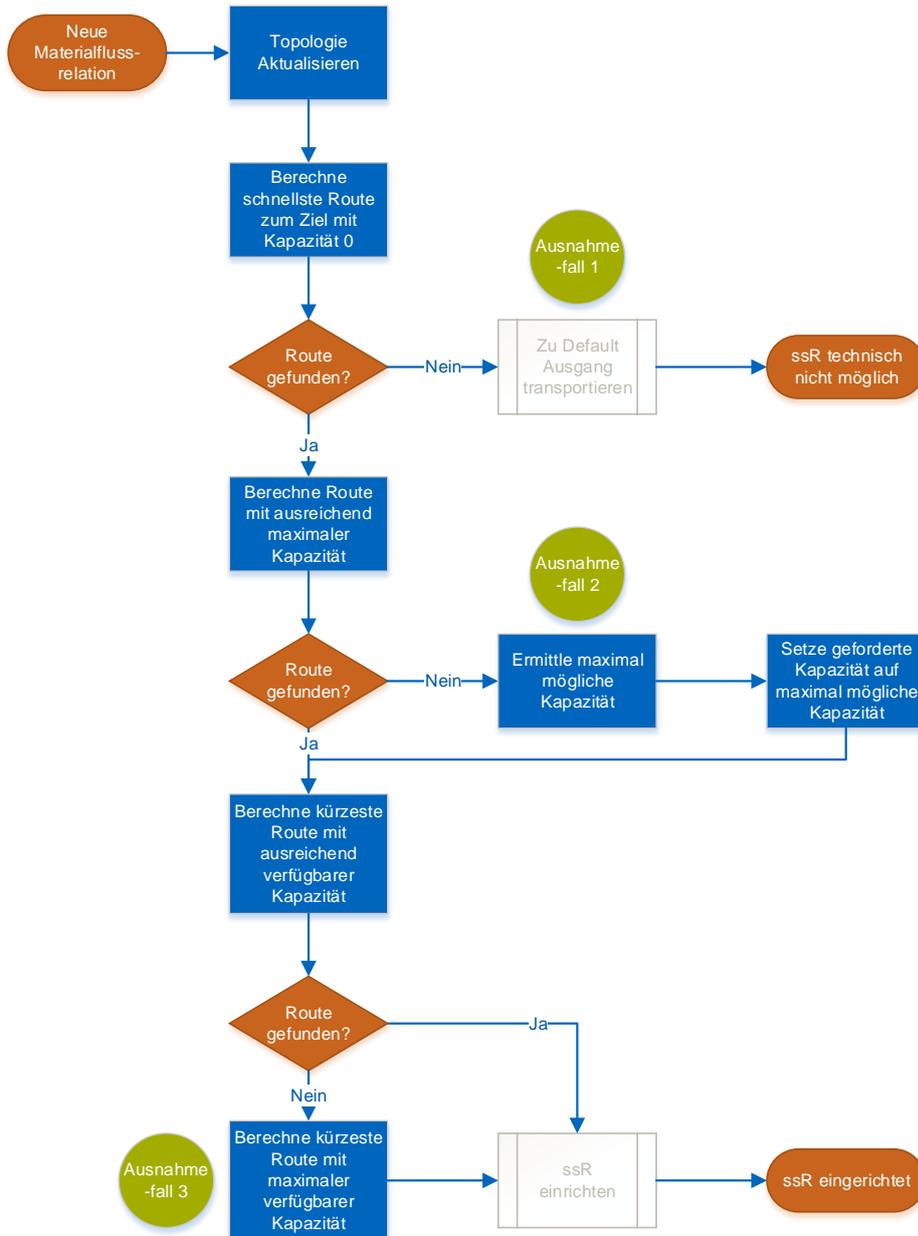


Abbildung 8-2: Darstellung des Vorgehens bei der Routenberechnung.

Zusammengefasst ist in folgenden Ausnahmefällen die Ermittlung einer ssR mit ausreichend Kapazität nicht möglich und führt somit zu einer Anpassung der geforderten Kapazität:

1. **Ausnahmefall 1:** Die benötigten Verbindungen zwischen dem Start- und dem Ziel-aMFM existieren nicht. Das aMFS ist technisch nicht in der Lage, die Materialflussrelation zu bewältigen.
2. **Ausnahmefall 2:** Die angeforderte Kapazität der Materialflussrelation überschreitet die maximale Kapazität einer oder mehrerer Verbindungen zwischen

dem Start- und dem Ziel-aMFM. Das aMFS ist technisch nicht in der Lage, die Materialflussrelation zu bewältigen.

3. **Ausnahmefall 3:** Die angeforderte Kapazität der Materialflussrelation überschreitet die verfügbare Kapazität einer oder mehrerer Verbindungen zwischen dem Start- und dem Ziel-aMFM. Das aMFS ist technisch in der Lage die Materialflussrelation zu bewältigen.

Für die Einrichtung einer temporären ssR geht die Routenberechnung nach den folgenden beiden Prämissen vor: Die erste Prämisse fordert, dass die maximale Kapazität der Verbindungen größer oder gleich der geforderten Kapazität sein muss. Ansonsten löscht die Optimierung die temporäre ssR auf jeden Fall und berechnet für die Materialflussrelation eine neue ssR. Darüber hinaus kann eine temporäre ssR auf einem ungeeigneten aMFM, das aufgrund seiner zu geringen maximalen Kapazität nie für die betreffende ssR ausgewählt worden wäre, eine Optimierung anstoßen. Die zweite Prämisse fordert, dass die Routenberechnung eine Route mit der größten verfügbaren Kapazität auswählt. Hierdurch erreicht die Routenberechnung, dass die Optimierung möglichst wenig bestehende ssR neu plant, um die geforderte Kapazität zur Verfügung zu stellen.

Die Routenberechnung basiert auf den Kapazitätsberechnungen, die in Kapitel 7 hergeleitet und vorgestellt wurden. Die Kapazitätsberechnungen berücksichtigen aMFM interne und übergreifende Ressourcenkonflikte, die durch die Abhängigkeit zwischen Transporten in einem aMFS induziert sind. Somit ist Anforderung A77 erfüllt, Ressourcenkonflikte zu berücksichtigen. Die analytischen Verfahren zur Kapazitätsberechnung sind aufgrund der vielfältigen stochastischen Einflüsse nicht in der Lage die Realität exakt abzubilden. Es kann daher nicht Ziel der Routenberechnung sein, den zukünftigen aMFS Zustand exakt vorherzusagen. Daher handelt es sich bei den Verfahren zur Kapazitätsberechnung um eine Möglichkeit, kritische Bereiche, in denen wahrscheinlich die Grenzen der Kapazität erreicht oder überschritten werden, zu identifizieren. Insbesondere für die kritischen Bereiche ist es möglich, einen kalkulatorischen Wert für die erreichbare Kapazität zu berechnen. Dies bietet die Möglichkeit, in der Routenberechnung kritische Bereiche miteinander zu vergleichen und die relativ beste Routenalternative auszuwählen. Welche erreichbaren Kapazitäten und Transportzeiten sich in der Praxis einstellen, kann nur das aMFS im operativen Betrieb ermitteln und an die Planung zurückspielen.

### 8.2.1 Einrichtung von ssR

Nach der Ermittlung einer Route durch die Routenberechnung kommt im nächsten Schritt die Einrichtung der ssR. Die Routenberechnung teilt den beteiligten aMFM mit,

dass sie Teil der ssR sind. Die aMFM prüfen die Einrichtung der ssR auf Zulässigkeit. Beispielsweise können sich zwischen dem letzten Aktualisierungszeitpunkt der Topologie und dem Einrichtungszeitpunkt Änderungen ergeben. Nach einer erfolgreichen Prüfung trägt das aMFM die ssR ein, reserviert die geforderte Kapazität und informiert das Start-aMFM. Melden alle beteiligten aMFM eine erfolgreiche Einrichtung zurück, gibt das Start-aMFM die ssR zur Nutzung frei. Erhält das Start-aMFM von einem beteiligten aMFM keine oder eine negative Rückmeldung, wird der Einrichtungsvorgang abgebrochen und die Neuberechnung der Route angestoßen.

Der Abbruch eines Einrichtungsvorgangs tritt z. B. auf, wenn eine geplante Verbindung zu einem benachbarten aMFM nicht mehr existiert oder das aMFM aufgrund eines Ausfalls nicht mehr erreichbar ist. Wenn sich zwischen der Aktualisierung der Topologie und Einrichtung der ssR Änderungen bei der Transportzeit oder Kapazität ergeben haben, wird die ssR zunächst trotzdem eingerichtet. Hierdurch wird vermieden, dass sich die Routenberechnung in einer Schleife wiederholt, falls sich zwischen der Aktualisierung der Topologie am Start-aMFM und dem Einrichten der ssR wiederholt Änderungen ergeben. Dieses Vorgehen steigert somit die Robustheit der Routenberechnung. Falls sich signifikante Änderungen ergeben, wird dies bei der Routenoptimierung oder der Routenüberprüfung im Nachhinein berücksichtigt.

### 8.2.2 Absagen von ssR

Grundsätzlich sind alle aMFM in der Lage eine ssR abzusagen. Zu diesem Zweck informiert das aMFM, das eine ssR löscht, alle an der ssR beteiligten aMFM. Die ssR wird zunächst auf den Status *Passiv* gesetzt, um laufende Transporte abzuschließen. aMFM ignorieren passive ssR bei der Berechnung der Topologie und Start-aMFM greifen nicht mehr bei der ssR Auswahl auf passive ssR zurück, sondern stoßen eine neue Routenberechnung an. Erst wenn alle laufenden und vorgemerkten Transporte auf der ssR abgeschlossen sind, löschen die beteiligten aMFM die ssR endgültig.

## 8.3 Optimierung von ssR

Die Routenberechnung ermittelt auf Basis der Berechnungsvorschriften, die in dieser Arbeit hergeleitet wurden, die relativ beste Route in Bezug auf minimale Transportzeit und verfügbarer Kapazität. Allerdings besitzt das aMFM, das die Routenberechnung ausführt, kein vollständiges Systemwissen. Zusätzlich berücksichtigt die Berechnung nicht sämtliche stochastischen Effekte eines aMFS, wodurch der zukünftige Systemzustand nicht exakt vorausgesagt werden kann. Nach der Einrichtung von ssR beobachten die aMFM daher den Systemzustand und verfügen über die Möglichkeit eine Optimierung anzustoßen.

Die Optimierung bei MPLS erfolgt oftmals manuell oder offline. Dies stellt für aMFS ebenfalls eine Möglichkeit dar. Für eine globale Betrachtung stellt die offline-Optimierung eine vielversprechende Lösung dar. Aufgrund der stochastischen Einflüsse in einem aMFS und gegenseitigen Abhängigkeiten zwischen den ssR kommen entweder heuristische oder simulationsbasierte Verfahren zum Einsatz. Beide Verfahren setzen eine hohe Rechenleistung voraus, um zeitnahe Ergebnisse zu liefern, und sollten daher auf einer leistungsfähigen, separaten Rechenhardware laufen. Offline-Verfahren erhalten vom aMFS die notwendigen Systeminformationen sowie Zielzustände und sind dann in der Lage, aMFS zu optimieren. Nach der Optimierung spielt die offline-Optimierung die Ergebnisse in das aMFS zurück. Allerdings reagieren offline-Optimierungen nur zeitverzögert, da die Anwendung zyklisch erfolgt [fml-2018c].

Im Rahmen dieser Arbeit soll ein selbstkonfigurierendes aMFS untersucht werden, daher behandeln die folgenden Abschnitte die Möglichkeiten einer Online-Optimierung. Der folgende Ansatz steht beispielhaft für das Potential, welches ssR für die Optimierung von aMFS bieten. Der folgende Abschnitt beschreibt die Identifikation von Optimierungspotential, Koordination von Optimierungen und Durchführung von Optimierungen auf Basis von ssR.

### 8.3.1 Identifikation von Optimierungspotential

Zur Optimierung eines aMFM und somit des aMFS muss das aMFS zunächst ermitteln, ob ein Optimierungsbedarf besteht. Ein Optimierungsbedarf besteht, wenn der erreichte vom geplanten (ehemals geforderten) Durchsatz abweicht. Hierfür muss eine neu eingerichtete oder geänderte ssR genug Zeit gehabt haben sich einzuschwingen. Insbesondere bei ssR mit geringen geplanten Kapazitäten (z. B. 2 TE pro Stunde) muss der Beobachtungszeitraum groß genug sein, um eine valide Aussage zum erreichten Durchsatz zu treffen. Wenn die beiden Voraussetzungen erfüllt sind, berechnet ein aMFM die Kennzahl *Erreichte ssR Auslastung*  $A_{ssR}$ . Die *Erreichte ssR Auslastung* eines aMFM berechnet sich nach (8-1) mit dem erreichten  $\lambda_{Err}$  und geplanten Durchsatz  $\lambda_{Res}$  aller ssR  $r$  des aMFM.

$$A_{ssR} = \frac{\sum_{r=1}^{ssRs} \lambda_{Err,r}}{\sum_{r=1}^{ssRs} \lambda_{Res,r}} \quad (8-1)$$

Allein die Kennzahl *Erreichte ssR Auslastung* eines aMFM ist noch kein Indikator, dass das aMFM einen Engpass darstellt. Auf einem aMFM können sich zufällig mehrere ssR treffen, die aufgrund mangelnder Kapazitäten bei anderen aMFM von der geplanten Kapazität abweichen. In Abbildung 8-3 ist ein Beispiel gezeigt, bei dem bei allen

aMFM der erreichte Durchsatz vom geplanten Durchsatz abweicht. Allerdings verfügen die Zu- und Abführstrecken der Quellen und Senken über ausreichend Kapazität und stellen somit keinen Engpass dar. Der eigentliche Engpass liegt im bB in der Mitte.

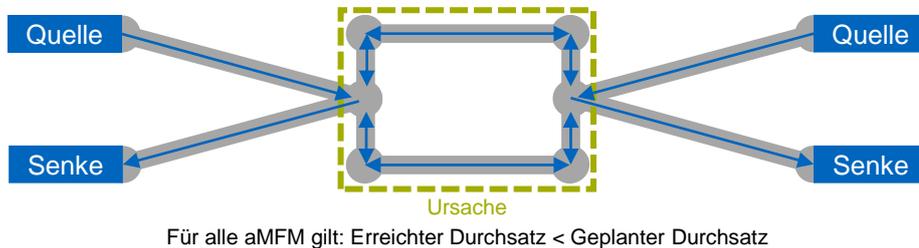


Abbildung 8-3: bB als Engpass für den Durchsatz eines aMFS.

Neben der *Erreichten ssR Auslastung* wird zusätzlich die *Berechnete Auslastung* eines aMFM benötigt. Die *Berechnete Auslastung* basiert auf den geplanten ssR und den in dieser Arbeit hergeleiteten Berechnungsverfahren. Die *Berechnete Auslastung* stellt analog zu den berechneten verfügbaren Kapazitäten der Verbindungen vorrangig einen Vergleich dar. Daher kann die *Berechnete Auslastung* auch nicht alleine zur Identifikation von Engpässen herangezogen werden, da ein aMFM trotz einer *Berechneten Auslastung* größer 100% den geplanten Durchsatz schaffen kann. Die *Erreichte ssR Auslastung* liefert somit einen Indikator, ob ein aMFM in der Praxis überlastet ist, und die *Berechnete Auslastung* einen Vergleich, welches aMFM am wahrscheinlichsten den ursächlichen Engpass darstellt.

Die Identifikation des Optimierungspotentials läuft folglich in zwei Schritten ab. Über die Berechnung der *Erreichten ssR Auslastung* bestimmt ein aMFM zunächst, ob Bedarf zur Optimierung der eingeplanten ssR besteht. Nachdem ein aMFM Bedarf zur Optimierung der eingeplanten ssR feststellt, beurteilt das aMFM mit der *Berechneten Auslastung*, ob das eigene aMFM überhaupt einen Engpass darstellt oder die Ursache nicht bei einem anderen aMFM liegt.

### 8.3.2 Koordination von Optimierungen

Die aMFM sind in der Lage, selbstständig Optimierungspotential zu identifizieren und eine Optimierung anzustoßen. Allerdings ist das aMFM nicht in der Lage, den exakten Systemzustand, wie die Auslastung eines veränderten (optimierten) Zustands zu bestimmen, da die in dieser Arbeit hergeleiteten Berechnungsmethoden vorrangig dem Vergleich von unterschiedlichen Routenalternativen dienen. Somit ist das aMFS auch nur in der Lage, verschiedene Optimierungsoptionen miteinander zu vergleichen. Ob die ausgewählte Optimierung anschließend Erfolg hat, lässt sich vorab nur durch eine Simulation oder im Nachhinein durch Beobachtung feststellen. Damit das aMFS den Erfolg einer Optimierung evaluieren und bei Bedarf weitere Optimierungen anstoßen

kann, muss dem aMFS nach einer Optimierung Zeit gelassen werden sich einzuschwingen. Daher sollten aMFM nicht selbstständig eine Optimierung anstoßen ohne dies mit anderen aMFM zu koordinieren.

Das Koordinator-aMFM stellt eine geeignete Instanz dar, um eine Optimierung anzustoßen und parallele, abhängige Optimierungen zu vermeiden. Zu diesem Zweck schicken aMFM, die ein Optimierungspotential identifiziert haben, die *Erreichte ssR Auslastung* und die *Berechnete Auslastung* an den Koordinator. Der Koordinator wählt dann ein oder mehrere aMFM mit der höchsten *Berechneten Auslastung*, die folglich mit der größten Wahrscheinlichkeit den ursächlichen Engpass darstellen, zur Optimierung aus. Die parallele Optimierung mehrerer aMFM bietet sich in großen aMFS an, die in unabhängige Bereiche aufgeteilt sind. Dies ist z. B. der Fall, wenn sich die ssR der verschiedenen Bereiche nicht begegnen. Ansonsten stößt der Koordinator nur eine Optimierung an und wartet die Einschwingphase des aMFS ab, bevor die nächste Optimierung folgt. Während der Einschwingphase werden ssR geändert, Transporte auf den veränderten ssR durchgeführt und die Kennzahlen auf den aMFM aktualisiert. Die Dauer der Einschwingphase hängt von der Größe des aMFS und den Schwankungen des geforderten Durchsatzes ab. In großen aMFS mit langen ssR dauert es länger, bis genügend Transporte auf einer neu eingerichteten ssR beendet wurden, damit jedes aMFM auf der ssR seine Kennzahlen aktualisieren kann. Die Bestimmung der Einschwingphase stellt auch bei Simulationsstudien einen wichtigen Aspekt dar. Daher kann hier auf etablierte Verfahren zurückgegriffen werden [Law-2015, S. 491ff.].

Die Auswahl von aMFM nach dem Kriterium der höchsten *Berechneten Auslastung* führt in manchen Fällen zu keiner Verbesserung des aMFS Durchsatzes. Dies ist zum einen der Fall, wenn für die ssR auf einem überlasteten aMFM keine Alternativrouten existieren. Zum anderen tritt der Fall auf, wenn das aMFM nicht der ursächliche Engpass ist. Um zu verhindern, dass ein aMFS durch die beiden Fälle in eine zwecklose Optimierungsschleife gerät, bieten sich die folgenden beiden Optionen: Nach der Optimierung eines aMFM darf der Koordinator die nächste Optimierung auf dem aMFM erst wieder nach einer Sperrfrist anstoßen. Die Sperrfrist ist lange genug zu wählen, dass der Koordinator währenddessen Optimierungen auf anderen aMFM anstößt. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, die durch die Optimierung hervorgerufenen Änderungen zu bewerten. Falls eine Optimierung zu keinen oder nur geringfügig geänderten ssR führt, stößt der Koordinator eine Optimierung auf dem aMFM mit der nächsthöheren *Berechneten Auslastung* an.

### 8.3.3 Durchführung einer Optimierung

Nach der Freigabe der Optimierung durch den Koordinator ermitteln aMFM selbstständig Änderungen und setzen diese um. Hierbei handelt es sich um eine lokale Online-Optimierung, die ein aMFM mit eigenem Wissen und Ressourcen durchführt. Im ersten Schritt der Online-Optimierung identifiziert ein aMFM die Ursache für die Abweichung des erreichten vom geplanten Durchsatz und unterscheidet zwischen zwei Ursachen:

1. **Effektive Überlastung:** Das aMFM ist in der Lage, alle TE physisch zu transportieren. Allerdings erreichen die TE das aMFM nicht ohne Unterbrechung oder können nicht optimal abgefertigt werden.
2. **Reale Überlastung:** Das aMFM ist nicht in der Lage alle TE physisch zu transportieren, auch wenn die TE kontinuierlich, ohne Unterbrechung ankommen und optimal abgefertigt werden.

#### Effektive Überlastung verringern

bB und Vorbereitungszeiten können zu einer effektiven Überlastung führen. In diesem Fall versucht das aMFM bB zu vermeiden und Vorbereitungszeiten zu minimieren. Hierfür berechnet das aMFM für ssR die durchschnittliche effektive Belegzeit  $T_{B,eff,ssR}$ , die für eine TE beansprucht wird. In bB berechnet sich die effektive Belegzeit nach (7-13) und bei einer Vorbereitungszeit nach (7-2). Im nächsten Schritt berechnet das aMFM für jede Verbindung  $n$  die durchschnittliche effektive Belegzeit  $T_{B,eff,ssR,n}$ , gewichtet mit dem geplanten Durchsatz einer ssR (vgl. (8-2)). Mit der effektiven Belegzeit für jede Verbindung ist das aMFM in der Lage, die Verbindungen in eine Rangfolge zu sortieren und ineffiziente Verbindungen zu identifizieren.

$$T_{B,eff,ssR,n} = \sum_{r=1}^{ssRs} T_{B,eff,ssR,r} * \frac{\lambda_{Res,r}}{\sum_{r=1}^{ssRs} \lambda_{Res,r}} \quad (8-2)$$

Ineffiziente Verbindungen eines aMFM sollten nicht genutzt werden, wenn das aMFM an seiner Kapazitätsgrenze arbeitet. Daher besitzt ein aMFM die Möglichkeit eine Verbindung zu sperren und auf den Status *Passiv* zu setzen. Der Status einer Verbindung ist ebenfalls in der lokalen aMFM und globalen aMFS Topologie vermerkt. Die Routenberechnung darf passive Verbindungen nicht nutzen, außer es existiert keine Alternativroute zum Ziel. Nutzt die Routenberechnung eine passive Verbindung, wird der Status wieder auf *Aktiv* geändert. Hierdurch sind auf einem aMFM nur passive Verbindungen eingetragen, für die es im aMFS Alternativen gibt.

Beginnend mit der ineffizientesten Verbindung prüft das aMFM zum einen, ob bei der betrachteten Verbindung die effektive Belegzeit größer ist als die reale Belegzeit. Zum anderen prüft das aMFM, ob für die eingeplanten ssR eine Alternativroute möglich ist.

Vor der Berechnung einer Alternativroute rechnet das aMFM die Route aus der globalen Topologie raus. Das aMFM kennt die Route der ssR und erhöht die verfügbare Kapazität auf den beteiligten Verbindungen um die geplante Kapazität. Die verfügbare Kapazität lässt sich aufgrund von Vorbereitungszeiten und anderen Faktoren zwar nicht durch einfache Addition exakt bestimmen, allerdings reicht das Ergebnis als Annäherung in diesem Fall aus. Falls keine Alternativroute existiert oder die Alternativroute nur unter Berücksichtigung passiver Verbindungen möglich ist, darf das aMFM die betrachtete Verbindung nicht auf den Status *passiv* setzen und das aMFM prüft die nächste ineffiziente Verbindung. Wenn das aMFS eine geeignete Verbindung identifiziert, setzt das aMFM den Status auf *passiv* und sagt alle ssR auf der Verbindung ab. Für das Beispiel aus Abbildung 8-3 ergibt diese Strategie z. B., dass das aMFS bei hohen geplanten Durchsätzen auf der oberen und unteren Kante jeweils nur TE in der gleichen Richtung transportiert. Bei niedrigen geplanten Durchsätzen erhält sich das aMFS die Flexibilität und beide Kanten fördern in beide Richtungen (vgl. Abbildung 8-4).

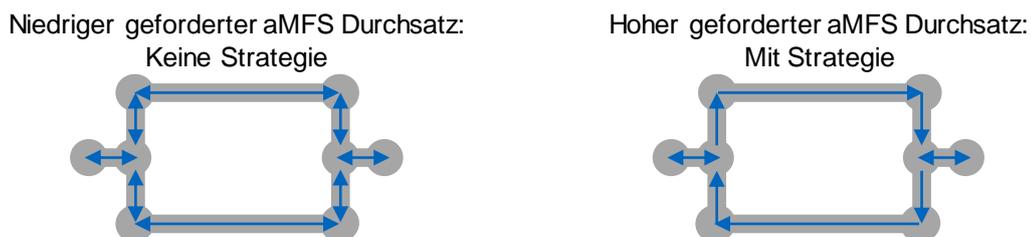


Abbildung 8-4: Sperren von Verbindungen bei hohen geforderten Durchsätzen.

### Reale Überlastung verringern

Für die Minimierung der realen Überlastung besteht nur die Möglichkeit ssR abzusa-gen und eine Alternativroute zu finden, die nicht über das betrachtete aMFM führt. Zu diesem Zweck führt das aMFM einen Vergleich durch, welche ssR mit dem geringsten negativen Effekt auf das aMFS abgesagt werden können. Negative Effekte sind in diesem Fall Umwege und eine verlängerte Transportzeit sowie Überlastungen an anderen Stellen im aMFS. Die Durchführung des Vergleichs erfolgt in Abhängigkeit der Routenberechnungsart, die folgendermaßen klassifiziert ist:

1. **Online:** Die ermittelte Route besitzt ausreichend verfügbare Kapazität.
2. **OnlineForced:** Die ermittelte Route besitzt nicht ausreichend verfügbare Kapazität und kann somit zu einem Engpass führen.
3. **OnlineP:** Die ermittelte Route nutzt passive Verbindungen und besitzt ausreichend verfügbare Kapazität.
4. **OnlineForcedP:** Die ermittelte Route nutzt passive Verbindungen und besitzt nicht ausreichend verfügbare Kapazität.
5. **Offline:** Die Route wurde offline ermittelt oder manuell vorgegeben.

Im Rahmen des Vergleichs führen aMFM eine erneute Routenberechnung für die ssR durch und ermitteln jeweils eine Alternativroute. Zur Ermittlung einer Alternativroute schließt die Routenberechnung das betrachtete aMFM aus. Falls die erneute Routenberechnung mit dem aktuellen Systemzustand ergibt, dass die neue Route nicht über das aktuelle aMFM verläuft und mit der Routenberechnungsart *Online* klassifiziert ist, sagt das aMFM die aktuelle ssR ab. Im anderen Fall erfolgt ein Vergleich der aktuellen mit der alternativen Route, den aMFM auf Basis der Fallunterscheidung nach Tabelle 8-2 durchführen.

Tabelle 8-2: Auswahl eines Verfahrens zum Vergleich zwei Routenalternativen auf Basis der Routenberechnungsart.

|                |               | Alternativroute          |                   |                   |                  |                    |
|----------------|---------------|--------------------------|-------------------|-------------------|------------------|--------------------|
|                |               | Online                   | OnlineForced      | OnlineP           | OnlineForcedP    | Offline            |
| Aktuelle Route | Online        | Vergleich Transportdauer | Keine Aktion      | Keine Aktion      | Keine Aktion     | Offline Einrichten |
|                | OnlineForced  | Online Einrichten        | Vergleich Forced  | Keine Aktion      | Keine Aktion     | Offline Einrichten |
|                | OnlineP       | Online Einrichten        | Online Einrichten | Vergleich Forced  | Keine Aktion     | Offline Einrichten |
|                | OnlineForcedP | Online Einrichten        | Online Einrichten | Online Einrichten | Vergleich Forced | Offline Einrichten |
|                | Offline       | Keine Aktion             | Keine Aktion      | Keine Aktion      | Keine Aktion     | Offline Einrichten |

Beim Vergleich nehmen die Routen mit der Routenberechnungsart *offline* einen Sonderstatus ein. Die Routen sind von außen vorgegeben und aMFM dürfen diese nicht verändern, um Konflikte mit einer offline-Optimierung oder den manuellen Bedienerwünschen zu vermeiden. Hierdurch ist Anforderung AT3 erfüllt, das aMFS manuell zu übersteuern. Die anderen ssR vergleicht das aMFM nach folgendem Vorgehen und sagt solange ssR ab, bis die reale Überlastung abgebaut oder zumindest minimiert ist. Folgende Handlungsanweisungen ergeben sich aus dem Vergleich:

1. **Online Einrichten:** In Tabelle 8-2 sind die Routenberechnungsarten in der Reihenfolge ihrer Ergebnisqualität aufgelistet. Eine Route mit der Klassifizierung *Online* ist beispielsweise immer einer Route mit der Klassifizierung *Forced* vorzuziehen. Dies spiegelt sich in der Tabelle mit den Einträgen *Online Einrichten* und *Keine Aktion* wider, da die Alternativroute ohne weitere Prüfung übernommen oder verworfen wird.
2. **Vergleich Transportdauer:** Das aMFM sortiert die Alternativrouten mit der Routenberechnungsart *Online* nach der zusätzlichen Transportdauer und sagt zunächst ssR mit dem geringsten Umweg ab.

3. **Vergleich *Forced*:** Das aMFM prüft, ob die verfügbare Kapazität oder zumindest die maximal verfügbare Kapazität auf der Alternativroute größer ist.

Die Verringerung der effektiven Überlast führt im Fall von bB zu einer einfacheren Koordination und damit effizienteren Einplanung von Transportaufträgen. Die Verringerung der realen Überlast hingegen verteilt den Verkehr gleichmäßiger auf das aMFS. Abhängig vom Layout eines aMFS und den Anforderungen an die Transporte, birgt die Verringerung der effektiven oder realen Überlastung das größere Potential. Die vorgestellte Strategie stellt nur eine Möglichkeit dar aMFS mit ssR zu optimieren. Weitere Möglichkeiten bestehen z. B. darin, die Sperrung von Verbindungen auf verschiedenen aMFM zu koordinieren. Durch die Transparenz der ssR ist es möglich, die betroffenen aMFM einer Route oder sogar die voneinander abhängigen Routen zu identifizieren und einzelne aMFM, Bereiche oder das ganze aMFS zu optimieren. Hierdurch erfüllen ssR Anforderung AT4, Verkehrsanalysen und -optimierungen auszuführen.

## 8.4 Koordination von Transporten

Für die Steuerung von Transporten in flexiblen Transportsystemen mit parallelen Transporten hat sich für die Koordination das zeitfensterbasierte Routing bewährt [Kim-1991; Mor-2010; May-2009; Sei-2016; Krü-2013; Fir-2018; Lie-2020]. Ein Vergleich und eine Bewertung der verschiedenen Verfahren findet sich unter anderem in [fml-2016a]. Das zeitfensterbasierte Routing ermittelt eine geeignete Kette an Modulen durch das System und variiert dabei die Verkettung der Module und Startzeitpunkte. ssR schränken den Lösungsraum ein, da die Verkettung der Module fest vorgegeben ist und nur noch der Startzeitpunkt variiert werden kann. Dies wird im Folgenden als zeitfensterbasiertes Routing bezeichnet. In Abbildung 8-5 ist für ein einfaches aMFS der Unterschied zwischen einem zeitfensterbasierten Routing und Reservierung gezeigt. Links ist das zeitfensterbasierte Routing dargestellt, bei dem zwischen zwei alternativen Verkettungen von aMFM und verschiedenen Startzeitpunkten gewählt werden kann. Rechts ist die Route durch die ssR bereits vorgegeben, so dass nur noch der Startzeitpunkt ausgewählt werden kann, wodurch die Auswahlmöglichkeiten eingeschränkt sind.

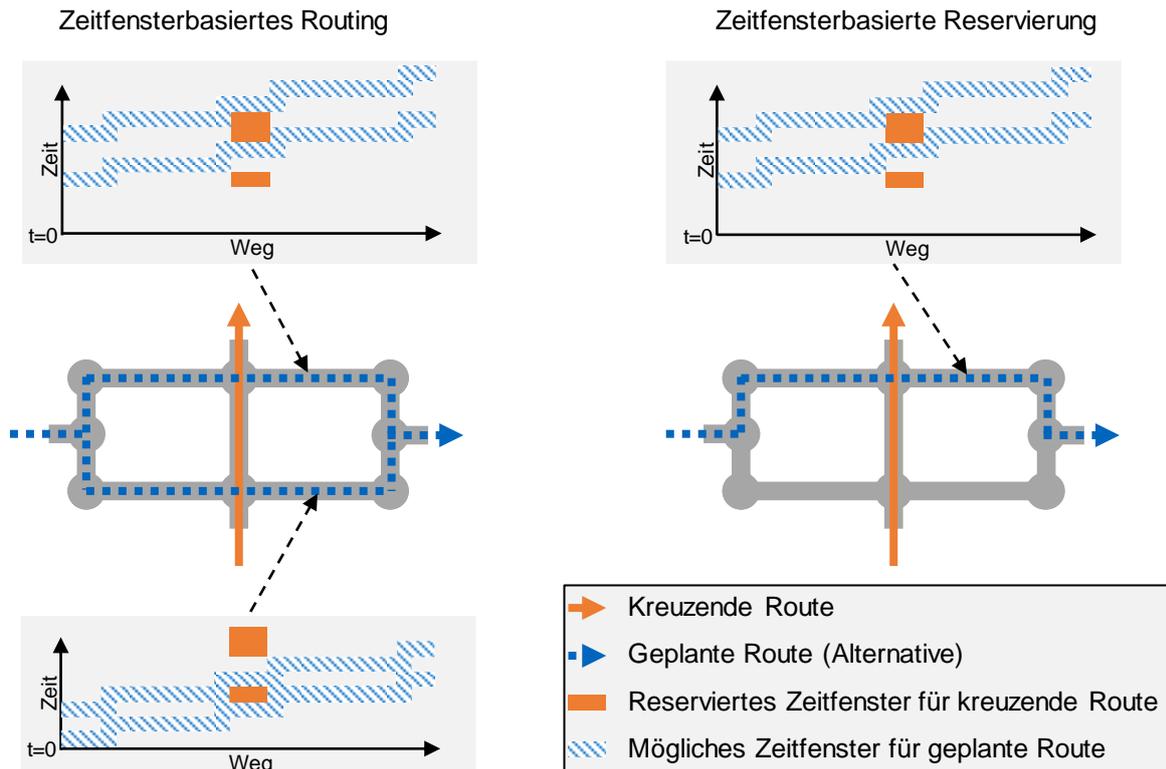


Abbildung 8-5: Vergleich des Lösungsraums eines zeitenfensterbasierten Routings und Reservierung.

#### 8.4.1 Startzeitpunkt bestimmen

Für die zeitenfensterbasierte Reservierung bestimmt das aMFS zunächst den Startzeitpunkt, zu dem eine Reservierung möglich ist. Die reservierten Zeitenfenster sind in einem dezentralen aMFS auf den aMFM gespeichert und müssen daher zunächst abgefragt werden. Die Abfrage kann durch ein definiertes aMFM erfolgen wie z. B. das Start-aMFM oder durch das Weiterleiten einer Reservierungsanfrage, die jedes aMFM um seine Informationen ergänzt und anschließend an das nächste aMFM auf der ssR weiterleitet. Der Vorteil einer weitergeleiteten Reservierungsanfrage liegt darin, dass die Verarbeitung der Anfrage verteilt erfolgt. Die Kommunikationsfrequenz ist in beiden Fällen dieselbe. Daher wird die Weiterleitung und lokale Verarbeitung einer Reservierungsanfrage bevorzugt.

Das Start-aMFM stößt eine Reservierungsanfrage an und teilt dem nächsten aMFM auf der ssR mit, um welche TE es sich handelt, auf welcher ssR der Transport erfolgt, wann der früheste Eintrittszeitpunkt zur Übergabe der TE an den Nachfolger ist und eine Reservierungsanfrage-ID. Das Nachfolger-aMFM bestimmt nun die freien Zeiträume, zu denen ein Transport möglich ist. Um die freien Zeiträume an das Nachfolger-aMFM übertragen zu können, werden die Zeiträume diskretisiert mit Intervallen einer festen Länge. Hierfür sind zwei Parameter entscheidend. Zum einen die Länge

eines Intervalls und zum anderen der Betrachtungszeitraum, wie in Abbildung 8-6 links gezeigt. Ein Intervall verfügt über Eigenschaften wie die Transportzeit und verfügbare Kapazität. Durch die Verwendung von Intervallen stellt das aMFS eine maximale Nachrichtengröße sicher. Ohne Intervalle besteht die Gefahr, dass sich sehr große Nachrichten ergeben, wenn ein aMFM über viele verschiedene Zeitfenster zu unterschiedlichen Zeitpunkten verfügt, die jeweils mit einem Startzeitpunkt, einem Endzeitpunkt und einer Kapazität beschrieben werden.

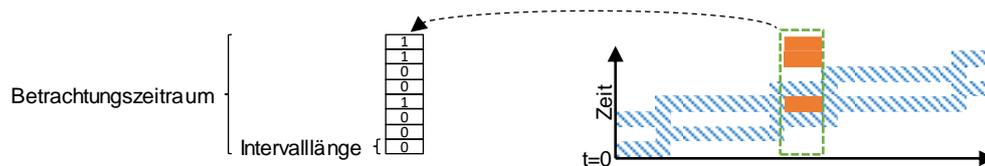


Abbildung 8-6: Diskretisierung der Reservierungen in Intervalle.

Die Intervalllänge stellt einen Kompromiss dar zwischen der Granularität der Planung und der Menge an Informationen, die ein aMFS versendet. Dies gilt ebenfalls für den Betrachtungszeitraum, der angibt, in welchem Zeitraum ein aMFM nach Zeitfenstern sucht. aMFS können die Intervalllänge und den Betrachtungszeitraum in Abhängigkeit der Kommunikationslast des aMFS variieren. Eine Parameterstudie mit variierten Werten findet sich im weiteren Verlauf der Arbeit.

### Ermittlung der Kapazitäten der Intervalle

aMFM bestimmen für jedes Intervall, beginnen mit dem frühesten Eintrittszeitpunkt bis zum Ende des Betrachtungszeitraums, welche Reservierungen anderer TE in einem Intervall liegen und somit Kapazität beanspruchen (vgl. Abbildung 8-6 rechts). Eine Reservierung erstreckt sich entweder über das volle Intervall oder startet, beziehungsweise endet in einem Intervall und geht dann nur anteilig in die Kapazitätsberechnung mit ein. Die Anfangskapazität eines Intervalls hängt davon ab, ob ein aMFM nur eine TE zeitgleich bearbeitet (Kapazität 1) oder mehrere TE parallel abfertigt. Abschließend zieht das aMFM von jedem Intervall noch die Kapazität ab, die der Transport der angefragten TE beansprucht.

Das aMFM vergleicht die Kapazitäten der Intervalle anschließend mit den Eigenschaften der Intervalle, die vom Vorgänger-aMFM übergeben wurden. Zur Auswertung des Vergleichs stehen grundsätzlich zwei Möglichkeiten zur Verfügung:

1. Minimale Kapazität
2. Mit Routenlänge gewichtete durchschnittliche Kapazität

Bei der minimalen Kapazität vergleicht das aMFM für jedes Intervall, ob die vom Vorgänger übergebene minimale Kapazität niedriger ist, als die auf dem aMFM ermittelte Kapazität. Anschließend gibt das aMFM dem nachfolgendem aMFM den niedrigeren Wert weiter, wie in Abbildung 8-7 gezeigt. Bei Verwendung der durchschnittlichen Kapazität, berechnet das aMFM hingegen die mit der Transportzeit gewichtete Durchschnittskapazität eines Intervalls auf der Route.

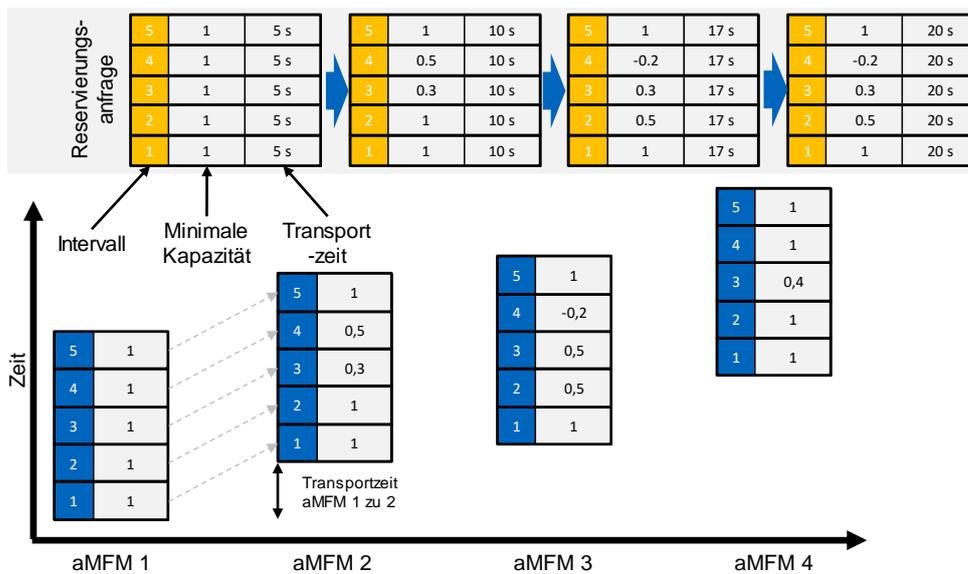


Abbildung 8-7: Ermittlung und Weitergabe der minimalen Kapazität eines Intervalls auf der Route.

### Berücksichtigung von bB und Wartezeiten

aMFM berücksichtigen bB gesondert, da hier neben der Kapazität eines aMFM auch die Richtung der bereits vorhandenen Reservierungen mit einfließt. Sind auf einem aMFM in einem bB bereits Reservierungen in gegenläufiger Richtung eingetragen, sperrt das aMFM die betroffenen Intervalle. Auch wenn die aMFM in einem bB über ausreichend Kapazität verfügen, ist ein gleichzeitiger Transport in gegenläufige Richtungen physikalisch nicht möglich und wird bereits während der Reservierung ausgeschlossen, wie in Abbildung 8-8 gezeigt.

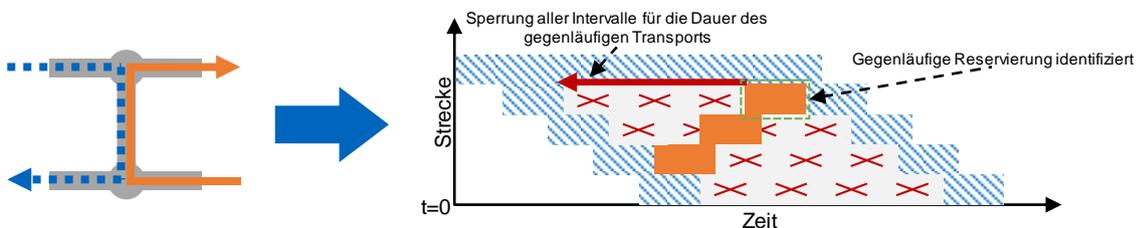


Abbildung 8-8: Sperrung von Intervallen bei einem bB mit gegenläufigen Reservierungen.

Mit Hilfe von ssR ist die Identifikation der betroffenen Intervalle einfach möglich, da die aMFM und Transportzeit durch den bB bekannt sind. Insbesondere auf langen ssR ist

die Wahrscheinlichkeit hoch, dass jedes Intervall irgendwann auf einen bB mit gegenläufig eingetragenen Reservierungen stößt. Besteht die Möglichkeit vor einem bB zu warten, bis der gegenläufige Transport vollständig abgeschlossen ist, stehen hierdurch wieder mehr zulässige Intervalle zur Verfügung.

In Abbildung 8-9 ist ein Beispiel gezeigt, bei dem mehrere Intervalle aufgrund eines gegenläufigen Transports gesperrt sind. Das nächste mögliche Intervall ist ebenfalls gesperrt, aufgrund eines früher stattfindenden Transports auf der ssR. Durch Warten auf dem Vorgänger-aMFM besteht nun die Möglichkeit, die Sperrung eines späteren Intervalls aufzuheben und das Intervall im weiteren Verlauf der ssR wieder zu berücksichtigen. Hierdurch verlängert sich die Transportzeit, die in den Eigenschaften der Intervalle hinterlegt ist. Das wieder zu berücksichtigende Intervall übernimmt dabei die Eigenschaften des Intervalls, das durch Warten die Sperrung aufhebt.

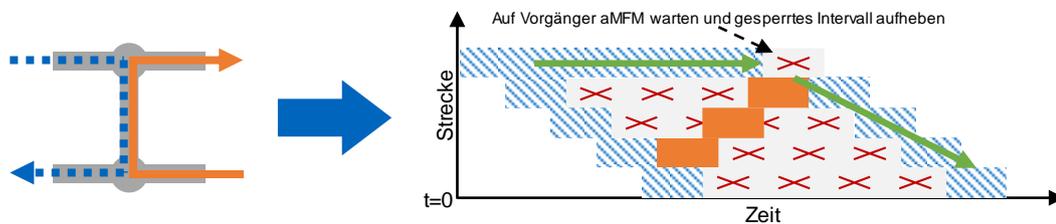


Abbildung 8-9: Durch das Warten auf einem Vorgänger-aMFM können gesperrte Intervalle aufgehoben und im weiteren Verlauf wieder berücksichtigt werden.

### Auswahl eines Intervalls am Ziel-aMFM

Erreicht eine Reservierungsanfrage das Ziel-aMFM, wählt es ein Intervall aus. Für die Auswahl eines Intervalls stehen verschiedene Strategien zur Verfügung, wie z. B. die drei folgenden:

- Frühester Startzeitpunkt: Auswahl des Intervalls mit dem frühesten Startzeitpunkt auf dem Start-aMFM (Ankunftszeitpunkt - Transportzeit) und ausreichend Kapazität
- Kürzeste Transportzeit: Auswahl des Intervalls mit der minimalen Transportzeit und ausreichend Kapazität.
- Maximal verfügbare Kapazität: Auswahl des Intervalls mit der maximalen Kapazität.

Sequenzbedingungen spielen ebenfalls in die Auswahl eines Intervalls hinein. Liegt am Ziel-aMFM beispielsweise eine vorgegebene Ankunftsreihenfolge von TE vor, darf das ausgewählte Intervall nicht vor dem Ankunftszeitpunkt der Vorgänger TE der Sequenz liegen. Die Arbeit evaluiert und diskutiert die Strategien in Abschnitt 10.5.

### 8.4.2 Reservierung einplanen

Nach der Auswahl eines Intervalls am Ziel-aMFM, startet die Reservierungsbestätigung. Die Reservierungsbestätigung umfasst die ID der Reservierungsanfrage, den gewünschten Eintrittszeitpunkt in das Nachfolger-aMFM und den frühesten Eintrittszeitpunkt in das Nachfolger-aMFM.

#### Reservierung zu festen Zeitfenstern

Der gewünschte und früheste Eintrittszeitpunkt geben die externen Grenzen des verfügbaren Zeitfensters vor, wie in Abbildung 8-10 gezeigt. Die bereits vorhandenen Reservierungen auf dem aMFM und die Transportzeit ergeben die internen Grenzen. Das verfügbare Zeitfenster ergibt sich aus der Schnittmenge des größten gemeinsamen Zeitbereichs, wie in Abbildung 8-10 anhand von zwei Beispielen gezeigt.

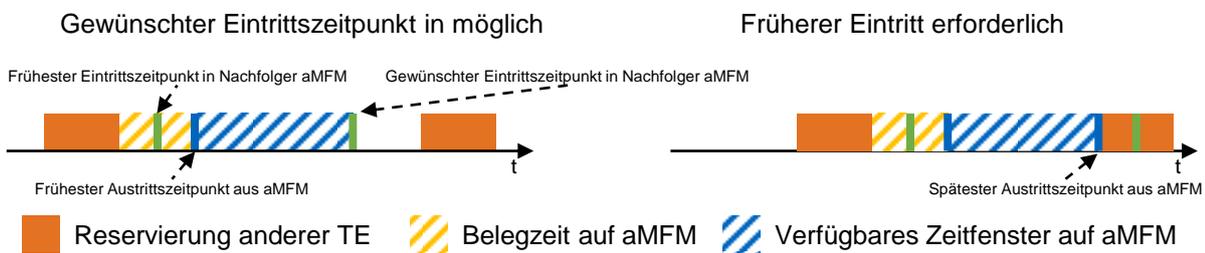


Abbildung 8-10: Ermittlung des verfügbaren Zeitfensters auf einem aMFM.

Das aMFM wählt ein Zeitfenster mit dem spätesten verfügbaren Eintrittszeitpunkt in das Nachfolger-aMFM aus. Wählt das aMFM einen früheren Zeitpunkt, müsste die TE auf dem nachfolgenden aMFM warten und blockiert das nachfolgende aMFM länger als notwendig. Nach der Auswahl eines Zeitfensters vermerkt das aMFM das Zeitfenster fix in der Reservierungstabelle und teilt dem Nachfolger-aMFM den ausgewählten finalen Eintrittszeitpunkt mit, damit das Nachfolger-aMFM das bereits fixierte Zeitfenster final anpasst. Das aMFM bestimmt für das Vorgänger-aMFM den gewünschten und frühesten Eintrittszeitpunkt. Falls im Rahmen der Reservierungsanfrage vermerkt wurde, dass eine TE auf dem aMFM warten soll, plant das aMFM an dieser Stelle die Wartezeit ein unter Berücksichtigung der vorangehenden Reservierung. Der früheste Zeitpunkt ergibt sich aus der Differenz zwischen dem gewünschten Eintrittszeitpunkt und dem Austrittszeitpunkt der vorangehenden Reservierung (vgl. Abbildung 8-11), währenddessen eine TE auf dem aMFM warten kann, um Konflikte mit anderen TE auf dem Vorgänger-aMFM auszugleichen. Sowohl das gewünschte Zeitfenster als auch die mögliche Wartezeit werden zunächst fix in der Reservierungstabelle vermerkt, bis im nächsten Schritt die finale Bestätigung des Vorgänger-aMFM für den Eintrittszeitpunkt eintrifft. Neben der Belegzeit auf dem aMFM muss hier auch eine Überlappung der Zeitfenster zwischen den aMFM berücksichtigt werden, da beispielsweise zwei Bandförderer für eine Übergabe parallel laufen. Das aMFM rechnet die Überlappung,

die für jeden Eingang auf dem aMFM vermerkt ist, auf den gewünschten und frühesten Eintrittszeitpunkt drauf und leitet die Reservierungsbestätigung an das Vorgänger-aMFM weiter.

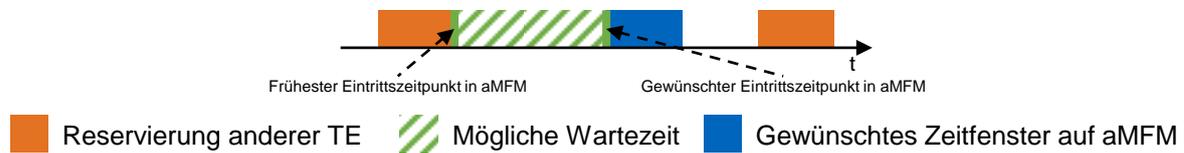


Abbildung 8-11: Ermittlung des gewünschten und frühesten Eintrittszeitpunkts.

Erreicht die Reservierungsbestätigung das Start-aMFM, ist die Reservierung erfolgreich und der Transport startet. Tritt irgendwo ein Fehler auf, wie z. B. nicht ausreichend große Zeitfenster aufgrund eines parallel bestätigten Transports, bricht das betreffende aMFM die Reservierung ab und der gesamte Reservierungsprozess startet von vorne. Das hier beschriebene Vorgehen gilt auch analog für aMFM, die mehrere TE parallel bearbeiten. In diesem Fall sind parallele Reservierungen erlaubt.

### Reservierung mit einer festen Reihenfolge

Die zeitenfensterbasierte Reservierung kann bei ssR im Gegensatz zum zeitenfensterbasierten Routing zu mehr wiederholten Reservierungsversuchen führen, da mangels Routenalternativen auf genau einer Route eine gültige Folge an Zeitfenstern gefunden werden muss. Insbesondere auf aMFM, auf denen sich mehrere ssR kreuzen, und in aMFS im Grenzbereich, ist die Wahrscheinlichkeit gering, dass zum gewünschten Startzeitpunkt noch eine Folge an ausreichend großen Zeitfenstern vorhanden ist. In Abbildung 8-12 ist ein Beispiel für Reservierungen gezeigt, bei dem die Lücken nicht für eine weitere Reservierung ausreichen. Solche Situationen treten insbesondere an Kreuzungen auf, an denen mehrere ssR unabhängig voneinander Reservierungen einplanen. Um an solchen Engpässen die Flexibilität zu erhöhen, sollten lokal parallele Reservierungen erlaubt sein.

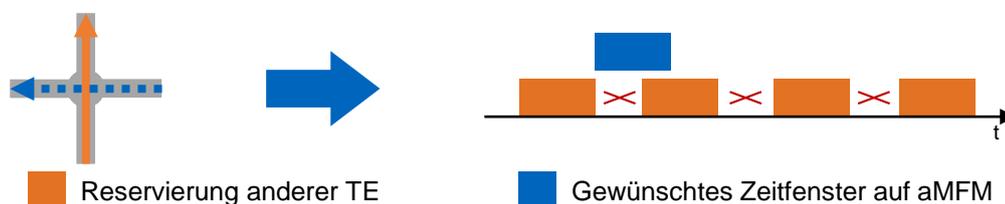


Abbildung 8-12: Anordnung der vorhandenen Zeitfenster verhindert eine weitere Reservierung.

Parallele Reservierungen verursachen lokale Staus und Verspätungen, da Reservierungen nicht zu ihrer ursprünglich geplanten Zeit ausgeführt werden können, sondern

auf dem Vorgänger-aMFM warten müssen. Solange die Reihenfolge der eingetragenen Reservierungen eingehalten wird, treten keine Blockierungen auf. Allerdings führen verspätet ausgeführte Reservierungen zu Staus auf Vorgänger-aMFM und hierdurch zu Blockaden. Daher gelten die Bedingungen, dass das Vorgänger-aMFM selbst keine Kreuzung sein darf, genug Zeit bis zur nächsten TE vorhanden sein muss, um die Verzögerung auszugleichen und die zusätzliche Verzögerung auf dem Vorgänger-aMFM vermerkt werden muss.

In Abbildung 8-13 ist durch das Verzögern der nachfolgenden Reservierung eine weitere Reservierung hinzugefügt worden. Hierdurch wartet die nachfolgende Reservierung ungeplant auf dem Vorgänger-aMFM, allerdings ist hier ein ausreichender zeitlicher Puffer vorhanden.

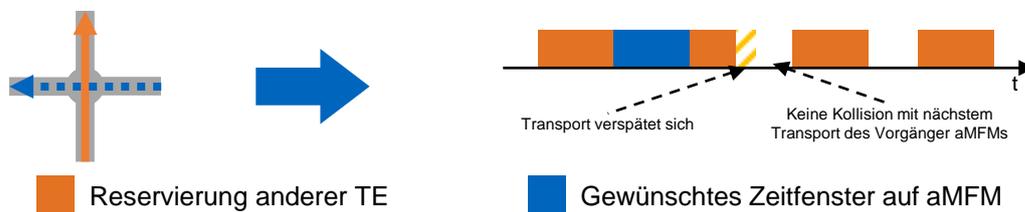


Abbildung 8-13: Einplanen einer weiteren Reservierung durch Verspätung einer Reservierung.

Durch die lokale Verzögerung bereits eingeplanter Reservierungen setzen sich die Verspätungen auf anderen aMFM fort, wenn keine zeitlichen Puffer zwischen Reservierungen vorhanden sind oder die Möglichkeit besteht Transporte zu beschleunigen, um die Verspätung wieder abzubauen. Der Effekt auf den Durchsatz wird in Abschnitt 10.5.2 untersucht.

### 8.4.3 Transport ausführen

Die Ausführung der Transporte erfolgt nach der Reihenfolge der eingetragenen Reservierungen. Ist eine TE bereit in das nächste aMFM einzutreten, meldet das aktuelle aMFM die TE beim Nachfolger an. Das nachfolgende aMFM prüft, ob die anfragende TE an der Reihe ist als nächstes einzutreten und ob die zeitlichen Restriktionen eingehalten sind. aMFM haben die Möglichkeit TE früher eintreten zu lassen als geplant, solange die Reihenfolge nicht verletzt wird und der Eintrag in der Reservierungstabelle aktualisiert wird. Die zeitfensterbasierte Reservierung vermeidet Blockaden, ermöglicht die Anlieferung von TE zu vorgegebenen Zeitfenstern und erlaubt die Herstellung einer Sequenz von TE am Ziel-aMFM. Somit sind Anforderungen AT8, AT9, Stillstände durch Blockaden auszuschließen, und AT10 erfüllt, TE in einer vorgegebenen Sequenz anzuliefern.

## 8.5 Ausfall von aMFM

In einem aMFS kann es jederzeit zu geplanten oder ungeplanten Ausfällen von aMFM kommen. Geplante Ausfälle liegen vor, wenn der Bediener ein aMFM mit Absicht deaktiviert, um z. B. eine Wartung oder Umbau durchzuführen. Unbeabsichtigte Ausfälle liegen vor, wenn das aMFM ohne Vorwarnung nicht mehr erreichbar ist oder in der Lage ist seine Aufgaben auszuführen, wie z. B. bei einer Störung. Im Folgenden ist der Ablauf beschrieben, den das aMFS beim Ausfall eines aMFM durchläuft: Grundsätzlich existieren drei Wege, über die ein aMFS erfährt, dass ein aMFM nicht mehr zur Verfügung steht.

- Geplant: Der Bediener teilt dem aMFS über eine Mensch-Maschine-Schnittstelle mit, dass ein aMFM zukünftig nicht mehr zur Verfügung steht.
- Ungeplant (Störung): Das aMFM teilt dem Koordinator selber mit, dass eine Störung aufgetreten ist und es nicht mehr zur Verfügung steht.
- Ungeplant (Kommunikationsabbruch): Das Serverwerkzeug erreicht das aMFM nicht mehr und informiert den Koordinator.

Nach dem Ausfall eines aMFM ergreift das aMFS folgende Maßnahmen:

1. Alle Quellen stoppen zunächst alle neuen Transporte.
2. Alle Start-aMFM prüfen, ob das ausgefallene aMFM an ihren ssR beteiligt ist und setzen in diesem Fall den Status der ssR auf *PassivAusfall*.
3. Sind Übergaben mit dem ausgefallenen aMFM im Gange, deren Abschluss nicht mehr möglich ist, geht das beteiligte aMFM auch in den Zustand *Ausfall*.
4. Die benachbarten aMFM löschen alle Reservierungen, die vom ausgefallenen aMFM kommen, bis zum Ziel-aMFM. Die ursprünglich geplanten TE können die Reservierungen nicht mehr wahrnehmen und behindern sonst andere TE.
5. Alle aMFM melden die IDs der TE, deren ssR vom Ausfall unmittelbar betroffen ist, an den Koordinator. Dies betrifft nicht TE auf dem ausgefallenen aMFM.

Nach Umsetzung der Sofortmaßnahmen besitzt der Koordinator einen Überblick über die unmittelbar betroffenen TE im aMFS und das aMFS leert sich, um somit die nachfolgenden Umplanungen zu erleichtern. Die Umplanung nimmt sich aller TE an, die ihr Ziel nicht mehr über die ursprünglich geplante ssR erreichen. Falls sich eine betroffene TE auf einem aMFM befindet, aktiviert die Funktionsebene die Umplanung.

Ist in der Reservierungstabelle kein nachfolgender Transport eingetragen, veranlasst die Umplanung die Löschung der Reservierungen auf allen nachfolgenden aMFM für

die betroffene TE. Die TE ist somit auf dem aMFM zwischengepuffert und die Umlanung stößt eine reguläre Routenberechnung zum Ziel-aMFM an mit einer geforderten Kapazität von 0, damit umgehend die kürzeste Route ermittelt wird. Falls eine ssR zum Ziel-aMFM eingerichtet werden kann, stößt das aMFM die reguläre Einplanung des Transports an. Falls die betroffene TE das Ziel-aMFM durch den Ausfall nicht mehr erreicht, veranlasst das aMFM einen Transport zur Default Senke oder einer anderen Senke, um die TE aus dem aMFS zu befördern.

Falls in der Reservierungstabelle des aMFM bereits ein weiterer Transport nach der betroffenen TE eingeplant ist, übergibt das aMFM die TE wie geplant zum nächsten aMFM auf der ssR. Dies wiederholt sich solange, bis die TE ein aMFM erreicht, auf dem keine nachfolgende Reservierung vorhanden ist, so dass eine Umlanung analog zu oben stattfinden kann. Stoppt ein aMFM eine TE, obwohl eine nachfolgende Reservierung eingetragen ist, treten möglicherweise Blockierungen auf oder die Einplanung eines neuen Transports ist unmöglich, wenn der Transport in der Vergangenheit geplant werden muss, um das Zeitfenster der nachfolgenden Reservierung nicht zu verletzen.

Nicht immer ist es für eine TE möglich ein aMFM ohne Nachfolereservierung zu erreichen, insbesondere, wenn viele TE im aMFS betroffen sind. In diesem Fall sind auch gegenseitige Blockierungen nicht mehr ausgeschlossen. Nicht nur von einer ssR Abgabe betroffene TE, sondern auch TE anderer ssR können im Rahmen eines aMFM Ausfalls in eine Blockierung involviert sein (vgl. Abbildung 8-14).

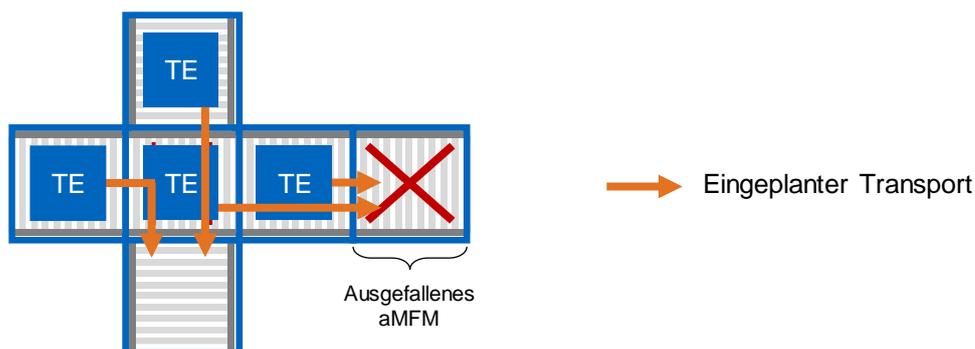


Abbildung 8-14: Durch einen aMFM Ausfall verursachte Blockierung.

Eine Blockierung liegt vor, wenn sich ein aMFM im Status *Ausfall* befindet, die Übergabe einer TE zum Nachfolger nicht freigegeben wird und das Zeitfenster verletzt ist. In diesem Fall veranlasst das aMFM die Löschung der Reservierungen auf allen nachfolgenden aMFM für die betroffene TE. Die Löschung der Reservierungen sorgt dafür, dass die Ausführung von Transporten anderer TE, die auf die betroffene TE gewartet

haben, auf den nachfolgenden aMFM nun möglich ist. Das aMFM versucht für die betroffene TE eine ssR zum Ziel einzurichten und die TE einzuplanen. Befindet sich das aMFM nach wie vor im Status *Ausfall* und ist die Einplanung auch nach mehrfachen Versuchen nicht erfolgreich, liegt wahrscheinlich eine gegenseitige Blockierung der Einplanungsversuche vor. In diesem Fall verhindert die parallele Einplanung zweier TE eine erfolgreiche Reservierung. In Abbildung 8-15 versucht die TE auf der Kreuzung die Einplanung auf einer neuen ssR zu erreichen, wird aber durch die obere TE daran gehindert.

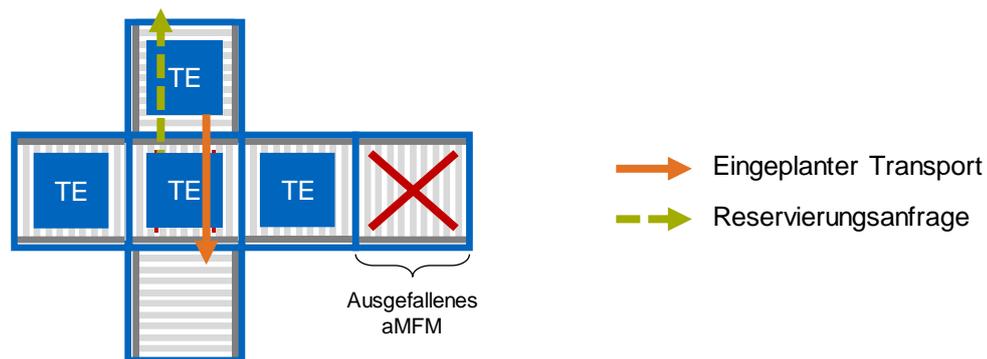


Abbildung 8-15: Gegenseitige Blockierung der Einplanungsversuche.

Sucht sich eine TE ein anderes Ziel aus, wie z. B. eine Default Senke, löst sie damit die gegenseitige Blockierung auf. Allerdings ist es möglich, dass die TE verschiedene alternative Ziel-aMFM ausprobieren muss, um die Blockierung aufzulösen. Für das Beispiel in Abbildung 8-15 löst die obere TE die Blockierung auf, wenn sie ein Ziel mit einer ssR auswählt, auf der sie das aktuelle aMFM nach oben verlässt. Umgekehrt löst die TE auf der Kreuzung die Blockierung aus, wenn sie das aMFM nach unten verlässt.

Die Eigenschaft ein alternatives Ziel-aMFM auszuwählen, ermöglicht es dem aMFS zusätzlich TE im System zu puffern. Eine Pufferung ist beispielsweise notwendig, um eine Sequenz an einer Senke herzustellen oder die Ankunft von TE zu verzögern ohne dabei die Quelle zu blockieren. Ein Konzept zur Auswahl von alternativen Zielen und Strategien in einem aMFS beschreiben *Lieberoth-Leden et al.* [Lie-2018b].

Je länger der Status *Ausfall* andauert, desto mehr aMFM detektieren Blockierungen, löschen bestehende Reservierungen und suchen alternative Ziele. In der Folge finden schrittweise alle TE einen Ausgang aus dem aMFS. Der Koordinator gleicht jede austretende TE aus dem aMFS mit der Liste der unmittelbar betroffenen TE ab. Sobald alle unmittelbar betroffenen TE aus dem aMFS entfernt sind, versetzt der Koordinator die aMFM wieder in den Status *aktiv*, die Quellen löschen die betroffenen ssR endgültig und das aMFS kehrt zum Normalbetrieb zurück.

Nur durch den ungeplanten Ausfall eines aMFM sind Blockierungen möglich, da im Falle eines geplanten Ausfalls der Bediener erst alle eingeplanten Transporte abwartet, bis er das aMFM endgültig aus dem aMFS herausnimmt. Der geplante Ausfall beeinflusst in der Folge das aMFS nur durch den Wegfall von ssR, während der ungeplante Ausfall einen temporären Einbruch der Leistungsfähigkeit nach sich zieht, dessen Dauer abhängig vom Auftreten von Blockierungen ist. Das aMFS ist aber in beiden Fällen in der Lage den Ausfall von aMFM zu kompensieren und erfüllt Anforderung *AT11*.

## 9 Implementierung

---

Die Simulation stellt eine Möglichkeit dar, das Verhalten eines Systems bereits in der Entwicklungsphase zu untersuchen und zu optimieren. Im Rahmen einer Fabriksimulation unterstützt eine Simulation das Aufdecken von Engpässen, die Ermittlung von ungenutzten Potentialen, den Vergleich verschiedener Planungsvarianten, das Testen verschiedener Parametersätze hinsichtlich Kapazität und Leistungsgrenzen sowie weiterer Faktoren [Ban-2008, S. 9]. Um den Einfluss der Konfigurationsparameter und das Systemverhalten, für das in dieser Arbeit entwickelte Konzept zur Steuerung von aMFS zu untersuchen, bietet sich eine Simulation an. Analytische mathematische Modelle können die Problemstellung nicht abbilden und das zu untersuchende System weist eine hohe Komplexität hinsichtlich der vielfältigen Einflüsse auf. Aus den Anforderungen ergibt sich somit, dass die Problemstellung simulationswürdig ist.

Der Aufbau einer Simulationsstudie besteht nach VDI 3633 aus mehreren Schritten [VDI-3633, S. 21ff.]. Am Anfang steht die Problemformulierung zusammen mit den Anforderungen an die Simulation. In dieser Arbeit soll die Simulation aMFM abbilden, die in einem aMFS durch Kooperation Transporte durchführen. Hierfür soll das Simulationsmodell die Steuerungsarchitektur und Steuerungslogik abbilden, die in dieser Arbeit hergeleitet wurden. Für die Untersuchung des Systemverhaltens soll das Simulationsmodell die Möglichkeit verschiedener Auswertungen bieten, wie z. B. den Systemdurchsatz und die durchschnittliche Durchlaufzeit der TE.

In den folgenden Abschnitten ist die Modellierung eines aMFS in der Software Tecnomatix Plant Simulation beschrieben. Die Simulationsumgebung Plant Simulation ist darauf spezialisiert, Produktionssysteme und -prozesse sowie den Materialfluss zu simulieren und auszuwerten [Sie-2019]. Neben der Modellierung erfolgt auch eine Verifizierung und Validierung des Modells. Die Aufgabe der Verifizierung ist die Überprüfung der Korrektheit des Modells. Es wird hierbei geprüft, ob das Modell und der implementierte Code auch die angestrebte Funktionalität abbilden. Die Aufgabe der Validierung ist zu überprüfen, ob das Modell auch mit dem realen System ausreichend genau übereinstimmt [VDI-3633, S. 37f.]. Für die Verifikation und Validierung stehen verschiedene Techniken zur Verfügung [Rab-2008, S. 93ff.]. In dieser Arbeit wurden die Animation von Vorgängen, Grenzwerttests, Monitoring, Sensitivitätsanalyse und Tests von Teilmodellen angewendet. Der Nachweis der grundsätzlichen Funktionalität entspricht nach *Blessing et al.* einer Unterstützungsevaluierung [Ble-2009, S. 184].

## 9.1 Struktur des Simulationsmodells

Im Folgenden ist die Struktur des Simulationsmodells zur Modellierung eines aMFS erläutert.

### 9.1.1 Modellierung des MAS für ein aMFS

Die Simulationsumgebung Plant Simulation stellt keine Agentenplattform zur Verfügung. Daher wurde die Modellarchitektur in Anlehnung an die FIPA Spezifikationen aufgebaut. Jedes aMFM besitzt einen eigenen Agenten, der wie in Kapitel 5 beschrieben, aus verschiedenen Steuerungsebenen besteht. Die Struktur der implementierten Steuerung ist in Abbildung B-1 gezeigt.

Die Systemebene ist echtzeitfähig und steuert die Sensoren und Aktoren. Nach dem Vorbild einer SPS arbeitet die Systemebene zyklisch ein Programm ab und greift auf simulierte Eingänge und Ausgänge von Sensoren und Aktoren zu. Hierfür liest die Ablaufsimulation Eingangswerte in Abhängigkeit des Status wie z. B. *true* oder *false* für eine Lichtschranke aus und setzt die Ausgangswerte wie z. B. die Geschwindigkeit für den Antriebsmotor eines Förderbandes. Die übergeordneten Ebenen arbeiten entweder zyklisch oder in Abhängigkeit der empfangenen Nachrichten und Aufgabe eventbasiert.

Neben dem aMFM MAS existiert im aMFS noch das Server-Tool, das neue Teilnehmer detektiert und initial die Kommunikation herstellt. Das Server-Tool ist ebenfalls im Ablaufsimulationsmodell abgebildet. Als übergeordnetes System dient ein simuliertes WMS, das nach vorgegebenen Kriterien Transportaufträge erzeugt und an das aMFS weiterleitet.

### 9.1.2 Modellierung eines aMFM

Das Simulationsmodell bildet sowohl die Fördertechnik als auch die Steuerung eines aMFM ab. Die Steuerung besteht aus einem allgemeinen und einem aMFM spezifischen Teil. Ein aMFM Baustein definiert daher den aMFM spezifischen Teil der Steuerung, die Fördertechnik und die Wissensbasis eines aMFM. Die aMFM Bausteine erben dabei den allgemeinen Teil von einem Standard-aMFM Baustein. Eine aMFM Bibliothek beinhaltet die aMFM Bausteine, die anschließend zu einem aMFS zusammengefügt werden.

aMFM Bausteine beschreiben die Fördertechnik eines aMFM, wie z. B. Förderbänder, Lichtschranken oder Handhabungseinrichtungen. Die Software Plant Simulation um-



aMFM erfolgt manuell, da im Ablaufsimulationsmodell keine automatische Prüfung der Eignung zwischen zwei Materialflussschnittstellen implementiert ist. Die Materialflussschnittstellen eines aMFM können mit keiner, einer, oder mehreren Materialflussschnittstellen anderer aMFM flexibel verbunden werden. In Abbildung 9-2 ist für das Beispiel einer H-Kreuzung mit 4 verbundenen Materialflussschnittstellen das aMFS Layout im Simulationsmodell gezeigt.

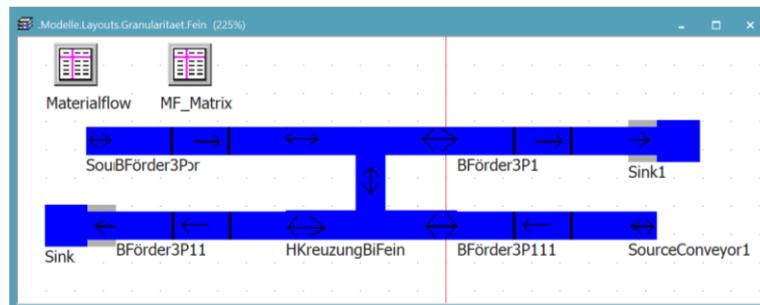


Abbildung 9-2: Beispiel für ein aMFS Layout bestehend aus aMFM Bausteinen.

#### 9.1.4 Auftragssteuerung

Eine übergeordnete Auftragssteuerung generiert gemäß einer Exponentialverteilung Aufträge. Hierfür kann manuell der maximale aMFS Durchsatz und eine Materialflussmatrix vorgegeben werden. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, die Materialflussmatrix zufällig zu generieren. Ein Transportauftrag besteht aus einer ID, einer Ankunftszeit im aMFS, einem Start-aMFM und einem Ziel-aMFM. Sobald die Ankunftszeit erreicht ist, generiert die Auftragssteuerung eine TE und setzt diese auf das Start-aMFM. Ist das Start-aMFM belegt, weil sich z. B. der Vorgänger Auftrag verzögert, wartet die Auftragssteuerung solange, bis das Start-aMFM wieder frei ist. Nach dem Erzeugen einer TE auf dem Start-aMFM, übermittelt die Auftragssteuerung dem aMFS die Auftragsdaten. Das aMFS transportiert TE zum Ziel-aMFM. Falls das Ziel-aMFM eine Senke ist, vernichtet das aMFM die TE. Dies entspricht z. B. einer Übergabe an eine Maschine oder manuellen Entnahme. Die Auftragssteuerung übernimmt somit die Rolle eines übergeordneten WMS-Systems sowie angeschlossener Quellen- und Senken, wie z. B. Lager oder Maschinen.

#### 9.1.5 Kommunikation

Innerhalb eines aMFM kommunizieren die verschiedenen Ebenen über den gemeinsamen Speicherbereich miteinander. In der Ablaufsimulation umfasst der gemeinsame Speicherbereich verschiedene Tabellen und Parameter, auf die die Methoden der verschiedenen Ebenen zugreifen und Daten auslesen oder schreiben.

Für die Kommunikation zwischen aMFM ist ein Nachrichtentransportsystem modelliert, an welches die aMFM angeschlossen sind. Im Rahmen des Konfigurationsprozesses eines neuen aMFM, registriert ein Agent Management System das neue aMFM. Das Agent Management System ist im aktiven Koordinator-aMFM angesiedelt und verwaltet z. B. die Namen und Transportadressen der aMFM Agenten. aMFM übergeben Nachrichten an das Nachrichtentransportsystem mit der eindeutigen aMFM-ID als Absender, der ID des Empfänger-aMFM, der Art der Nachricht und den Inhalt. Das Nachrichtentransportsystem übergibt danach die Nachricht an das Empfänger-aMFM. Neben der Übertragung von Informationen sind auch kommunikative Akte möglich. Ein kommunikativer Akt überträgt zum einen Inhalt und zum anderen eine geforderte Handlung des Empfängers.

## 9.2 Implementierung des Simulationsmodells

Die Implementierung der Steuerungsarchitektur und Steuerungslogik nach dem in dieser Arbeit beschriebenen Konzept ist im Folgenden beschrieben und verifiziert.

### 9.2.1 Automatische Generierung des Simulationsmodells

Das manuell erstellte aMFS Layout gibt die Position und Materialflussschnittstellen der aMFM Bausteine vor. Hieraus generiert der Layoutgenerator das Ablaufsimulationsmodell mit der Fördertechnik und den Steuerungen der aMFM. In Abbildung 9-3 links ist ein beispielhaftes aMFS Layout mit einer H-Kreuzung sowie Zu- und Abführstrecken abgebildet und rechts das hieraus automatisch generierte aMFS.

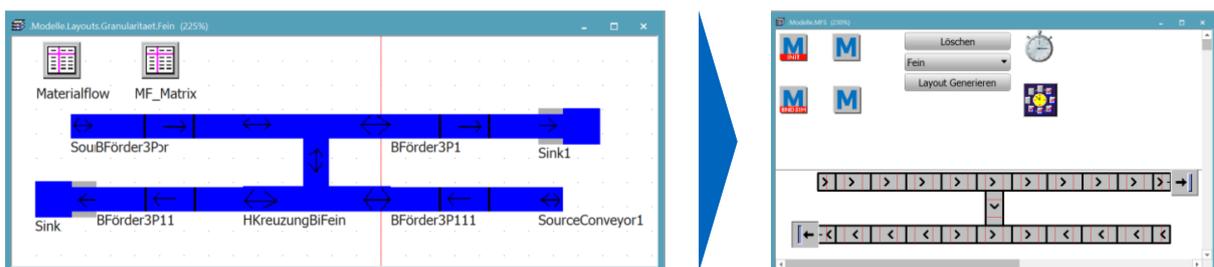


Abbildung 9-3: *Beispiel für die automatisch generierte Modellierung der Fördertechnik eines aMFS auf Basis des aMFS Layouts und aMFM Bausteine.*

Die Fördertechnikkomponenten und deren relative Anordnung entnimmt der Layoutgenerator dem aMFM Baustein und berechnet die absolute Position auf Basis der Anordnung im aMFS Layout. Der Layoutgenerator ergänzt den allgemeinen Teil der aMFM-Steuerung um den aMFM spezifischen Teil. Das Ergebnis des Layoutgenerators entspricht in der Realität einem aufgebauten aMFS, das noch nicht eingeschaltet wurde, und verifiziert somit die Modellgenerierung.

### 9.2.2 Serverwerkzeug und Koordinatorebene

Nach der Aktivierung eines aMFM in einem neu aufgebauten oder bereits bestehenden aMFS startet der Konfigurationsprozess, der in der Konfigurationsebene implementiert ist. Das Serverwerkzeug überwacht das Nachrichtentransportsystem und detektiert neue Teilnehmer. Das Simulationsmodell bildet hierfür das Serverwerkzeug in vereinfachter Form ab. Die aMFM in einem aMFS melden sich in zyklischen Abständen beim Serverwerkzeug. Das Serverwerkzeug identifiziert hierdurch neu hinzugekommene Kommunikationsteilnehmer und teilt diese dem Koordinator mit. Falls noch kein aMFM als Koordinator definiert ist, teilt das Serverwerkzeug dies dem neuen aMFM mit und das neue aMFM wird dann der aMFS Koordinator.

Die Koordinatorebene des Koordinator-aMFM trägt neue aMFM in das aMFM Verzeichnis ein, vergibt eine im aMFS eindeutige aMFM-ID und kommuniziert das neue aMFM an die bereits vorhandenen aMFM. Das Koordinator-aMFM ist Empfänger der Lokalisierungsdaten, die entweder von einem Lokalisierungsserver stammen oder die ein Bediener manuell über eine Mensch-Maschine-Schnittstelle eingibt. Das Simulationsmodell vereinfacht den Lokalisierungsprozess, indem es die Position des aMFM aus dem aMFS Layout ausliest. Dies entspricht in der Realität einer manuellen Eingabe der Position. Anschließend ermittelt die Koordinatorebene potenziell benachbarte aMFM auf Basis der Positionen sowie Interaktionsdurchmesser und übermittelt diese an das neue aMFM. aMFM erhalten im Simulationsmodell potenziell benachbarte aMFM, wodurch die grundsätzliche Funktionsweise des Serverwerkzeugs und der Koordinatorebene verifiziert ist.

Das Serverwerkzeug ist auch in der Lage, Veränderungen eines aMFS zu simulieren. Hierfür ist die Funktionalität implementiert, ausgewählte aMFM zu vordefinierten Zeitpunkten zum aMFS hinzuzufügen oder zu entfernen, indem das Serverwerkzeug die aMFM erst zeitverzögert an den Koordinator kommuniziert oder einen Ausfall meldet. Parallel schaltet das Serverwerkzeug die aMFM auf den Status *aktiv* oder *passiv*, wodurch der Betrieb und die Kommunikation eines aMFM aufgenommen oder eingestellt wird. Die hierdurch simulierten Ausfälle eines aMFM konnte das aMFS alle kompensieren und die betroffenen Transporte umplanen. Auch das Hinzufügen und Einbinden eines neuen aMFM funktioniert. Somit ist die Veränderung von aMFS im operativen Betrieb verifiziert.

### 9.2.3 Konfigurationsebene

Die aMFM Bausteine definieren bereits die nutzbaren Materialflussschnittstellen und das aMFS Layout gibt die verbundenen Materialflussschnittstellen vor. Die Konfigura-

tionsebene des neuen aMFM führt somit eine vereinfachte Konfiguration der Übergabeoperationen aus. Falls mit einem potenziellen benachbarten aMFM eine gemeinsame Materialflussschnittstelle existiert, parametrisiert die Konfigurationsebene die Übergabeoperationen und überführt diese in die LO-Liste. Das neue aMFM informiert das benachbarte aMFM über die neue gemeinsame Materialflussschnittstelle und das benachbarte aMFM konfiguriert und ergänzt ebenfalls die Übergabeoperationen in seiner LO-Liste. Beide aMFM bilden anschließend das theoretische Transportangebot und ermitteln die ausführbaren Transportangebote. Zur Verifikation ist für das Beispiel der H-Kreuzung in Abbildung 9-4 (vergrößerte Darstellung in Anhang B-3) links die LO-Liste und rechts das automatisch generierte ausführbare aMFM Transportangebot gezeigt. Abschließend erstellt die Konfigurationsebene die lokale Topologie und übermittelt diese an den Koordinator.

LO-Liste



Transportangebot

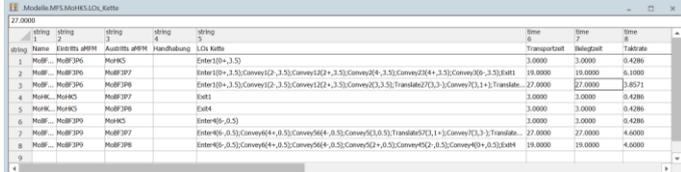


Abbildung 9-4: Aus der LO-Liste des H-Kreuzung-aMFM links wird automatisch das Transportangebot des aMFM rechts generiert.

### 9.2.4 Materialflussebene

Die Materialflussebene wird aktiv, sobald eine TE für einen Transport bereitsteht. Falls der TE noch keine ssR zugeordnet ist, ist das aktuelle aMFM das Start-aMFM und somit zuständig für die Auswahl einer ssR. Falls noch keine ssR zum Ziel eingerichtet ist, stößt die Materialflussebene die Neuberechnung einer ssR an. Zu Beginn einer Routenberechnung fordert das Start-aMFM eine Aktualisierung der globalen Topologie vom Koordinator an und bestimmt die geforderte Kapazität. Anschließend erfolgt die Ermittlung einer geeigneten ssR mit einem CSPF Dijkstra Algorithmus. Nach Ermittlung einer gültigen Route, stößt das Start-aMFM die Einrichtung der ssR auf den beteiligten aMFM an. Nach Bestätigung aller aMFM auf der ssR gibt das Start-aMFM die ssR frei und alle zukünftigen Transporte mit derselben Materialflussrelation nehmen die ssR in Anspruch. Abbildung 9-5 zeigt zur Verifizierung für ein großes aMFS Layout den Verlauf der eingerichteten ssR. Neben der Ermittlung und Einrichtung von ssR überwacht die Materialflussebene auch die eingerichteten ssR und ermittelt Kennzahlen. Auf Basis der Kennzahlen stößt die Materialflussebene Aktualisierungen sowie Optimierungen des aMFM und der ssR an.

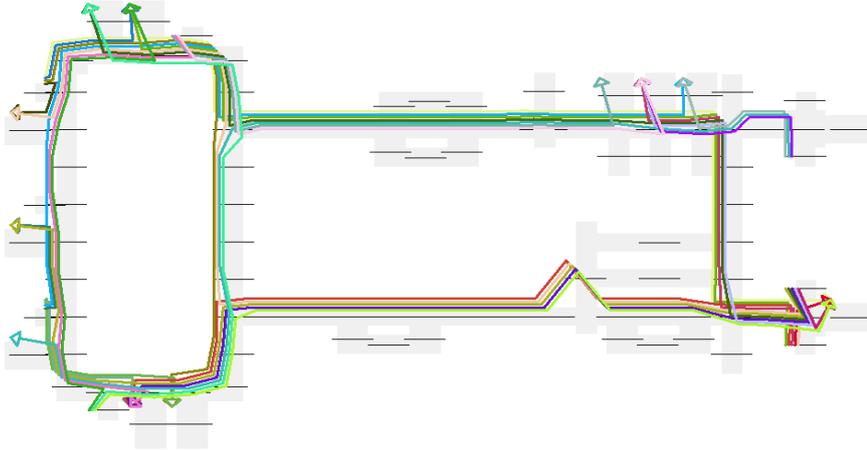


Abbildung 9-5: Verlauf von eingerichteten ssR (farbige Linien) in einem aMFS für verschiedene Materialflussrelationen.

### 9.2.5 Funktionsebene

Nach Zuordnung einer ssR zu einer TE, übernimmt die Funktionsebene die Einplanung des Transports. Hierfür sendet die Funktionsebene eine Reservierungsanfrage aus, die alle beteiligten aMFM entlang der ssR bearbeiten und weiterleiten. Erreicht die Reservierungsanfrage das Ziel-aMFM, wählt die Funktionsebene ein Intervall aus und stößt die Reservierungsbestätigung an, die wiederum die Funktionsebenen der beteiligten aMFM bearbeiten und weiterleiten. Erreicht eine gültige Reservierungsbestätigung das Start-aMFM, gibt die Funktionsebene die betreffende TE zum Transport frei.

Steht eine TE zum Eintritt in ein aMFM bereit, trägt die Funktionsebene die LO in den Ausführungsplan ein. Im einfachsten Fall trägt die Funktionsebene die LO am Ende des Ausführungsplans ein. Falls für das aMFM eine strategische Einplanung der LO vorgesehen ist, bestimmt die Funktionsebene zunächst den Einplanungsschritt im Ausführungsplan, an dem die neuen LO zwischen den bestehenden LO eingefügt werden sollen. Für die Bestimmung des Einplanungsschritts ist in der Funktionsebene eine aMFM-individuelle Logik hinterlegt, die z. B. im Falle einer H-Kreuzung die Bearbeitungsfolge der TE im Mittelstück optimiert.

Die neuen LO sind zunächst nicht für die Ausführung freigegeben. Die Funktionsebene gibt die LO phasenweise frei in Abhängigkeit des aktuellen Status der TE. Folgende Ereignisse lösen die Freigabe von LO aus:

- Vorgänger-aMFM meldet TE zur Übergabe an und aktuelles aMFM ist für Übergabe bereit → Freigabe der LO zum Eintritt der TE in das aktuelle aMFM
- TE ist vollständig in aktuelles aMFM eingetreten → Freigabe aller LO, bis auf die LO zum Austritt einer TE

- Übergabe an Nachfolger-aMFM steht an und Nachfolger-aMFM ist bereit für Übergabe → Freigabe der LO zum Austritt der TE aus dem aktuellen aMFM

Die Systemebene aktualisiert den Status der TE in der Reservierungstabelle, auf deren Basis die Funktionsebene die nächsten Schritte plant, wie z. B. Anfrage einer Übergabe an das Nachfolger-aMFM.

### 9.2.6 Systemebene

Die Systemebene prüft zyklisch den Ausführungsplan nach LO, die im ersten Ausführungsschritt eingeplant und freigegeben sind. Falls solch eine LO vorhanden ist, ruft die Systemebene das für die LO hinterlegte Programm auf und übergibt die in der Konfigurationsphase ermittelten Parameter an das Programm. Das Programm der LO liest die Eingänge der Sensoren, wie z. B. den Status einer Komponente vom Typ *Sensor* im Simulationsmodell, und schreibt die Ausgangswerte, wie z. B. die Befüllung der Variable *Geschwindigkeit* für die Komponente Förderband im Simulationsmodell. Das Programm gibt entweder den Status *arbeitend* oder *beendet* zurück. Im Falle des Status *arbeitend* bleibt die LO im Ausführungsplan stehen und das hinterlegte Programm wird somit im nächsten Zyklus erneut aufgerufen. Im Falle des Rückgabestatus *beendet* löscht die Systemebene die LO aus dem Ausführungsplan. Nach jedem Programmaufruf trägt die Systemebene den aktuellen Arbeitsraum, in dem sich die TE derzeit befindet, in die Reservierungstabelle ein.

Nachdem alle LO im ersten Schritt des Ausführungsplans gelöscht sind, rücken alle nachfolgenden Schritte um einen Schritt nach vorne und die Systemebene führt die LO des nächsten Schritts aus. In Abbildung 9-6 (vergrößerte Darstellung in Anhang B-4) ist für das Beispiel der H-Kreuzung ein Ausführungsplan vor dem Eintritt einer TE gezeigt, den die Systemebene nach dem Eintritt der TE schrittweise abarbeitet und somit eine TE durch das aMFS bewegt. Folglich ist die grundsätzliche Funktionsweise der Einplanung von Reservierungen, der Erstellung des Ausführungsplans, Freigabe von LO und Ausführung von LO verifiziert.



Abbildung 9-6: Beispiel für die schrittweise Abarbeitung eines Ausführungsplans.



## 10 Evaluation der Berücksichtigung von Transportabhängigkeiten in der Planungsphase

---

Das vorangegangene Kapitel beschreibt den Aufbau und die Implementierung des Simulationsmodells sowie den Nachweis der grundsätzlichen Funktionalität. Aufbauend auf diese Unterstützungsevaluierung evaluiert dieses Kapitel die Anwendbarkeit und den Erfolg in Bezug auf die in dieser Arbeit formulierten Ziele. Abhängigkeiten zwischen Transporten treten in aMFS sowohl lokal als auch global auf mit unterschiedlichen Auswirkungen auf die Leistungsfähigkeit eines aMFS. Im Rahmen dieser Arbeit wurden verschiedene Ansätze entwickelt, um Transportabhängigkeiten zu detektieren, zu bewerten und in der Planung zu berücksichtigen. Dieses Kapitel befasst sich zum einen mit der separaten Evaluation der entwickelten Ansätze und den hierbei getroffenen Annahmen. Zum anderen wird in diesem Kapitel das gemeinsame Zusammenwirken der einzelnen Ansätze und die Auswirkungen auf die Leistungsfähigkeit eines aMFS evaluiert.

### 10.1 Durchführung und Auswertung der Simulationsstudien

Die Simulationsstudien in diesem Kapitel laufen nach dem folgenden Muster ab: Im Rahmen einer Simulationsstudie werden die Eingabeparameter für das Modell vorgegeben und die Simulation gestartet. Während der Einschwingphase erfasst die Simulationsstudie zunächst keine Ausgabeparameter. Die Einschwingphase erlaubt dem aMFS sich zu stabilisieren. Die Dauer der Einschwingphase hängt von der Größe des aMFS ab und wird für jede Simulationsstudie individuell und manuell festgelegt.

In einem Versuchsplan sind die zu untersuchenden Eingabeparameter sowie Wertebereiche festgelegt und die Simulationsstudie generiert daraus Eingabeparametersätze. Die Eingabeparametersätze bilden einen Versuch (Experiment), das anschließend simuliert wird und die festgelegten Ausgabeparameter liefert. Jeder Versuch besteht aus mehreren Wiederholungen (Beobachtung), die jeweils unterschiedliche Zufallszahlenströme verwenden. Somit ist sichergestellt, dass das Simulationsmodell bei jeder Beobachtung für die stochastischen Parameter unterschiedliche Werte generiert. Die Anzahl der Beobachtungen hängt davon ab, in welchem Toleranzbereich sich die gemessenen Ausgabeparameter bewegen dürfen. Der Toleranzbereich lässt sich durch Konfidenzintervalle beschreiben. Konfidenzintervalle definieren einen Bereich, in dem sich der wahre Mittelwert mit einer gegebenen Wahrscheinlichkeit befindet. Als Wahrscheinlichkeit (Konfidenzniveau) hat sich für Simulationsstudien 95% bewährt. Somit

beträgt die Wahrscheinlichkeit 95%, dass ein Intervall den wahren Mittelwert umfasst [Law-2015, S. 511ff.]. Eine Simulationsstudie besteht aus mehreren Experimenten, für die jeweils das relative Konfidenzintervall mit dem Mittelwert als Basis bestimmt wird. Um die Toleranz einer Simulationsstudie bewerten zu können, wird zur Vereinfachung im Folgenden für jede Simulationsstudie der Mittelwert der Konfidenzintervalle aller Experimente für den betrachteten Ausgabeparameter angegeben.

## 10.2 aMFM Konfiguration

Dieser Abschnitt evaluiert die Konfiguration und aMFM interne Koordination von Transporten sowie den Einfluss auf die Leistungsfähigkeit des aMFS.

### 10.2.1 Granularität

Die Festlegung der funktionalen Freiheitsgrade beeinflusst die Koordination und Optimierung der Transportausführung, die in Abschnitt 6.1.1 diskutiert wurde. Um diesen Effekt zu veranschaulichen und zu evaluieren, wird in einer Simulationsstudie ein aMFM vom Typ H-Kreuzung mit verschiedenen Granularitätsstufen und unabhängigen aMFM variiert (vgl. Abbildung 10-1). Die H-Kreuzung stellt in aMFS eine der komplexeren Komponenten dar und eignet sich daher zur Evaluation der aMFM internen Koordination.

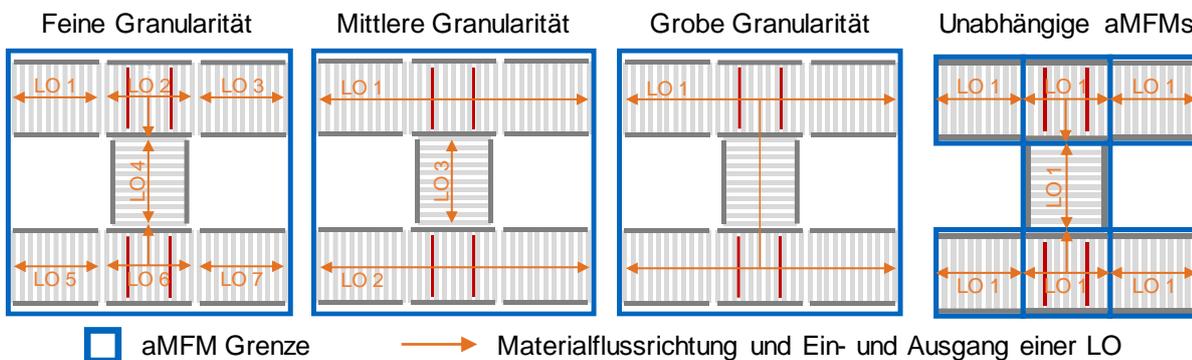


Abbildung 10-1: Gestaltung eines aMFM in verschiedenen Granularitätsstufen.

In der Simulationsstudie wird für das betrachtete aMFS ein Soll Durchsatz vorgegeben, den die Auftragssteuerung auf Basis einer Exponentialverteilung über zwei Quellen einsteuert. Am Ende einer Beobachtung ermittelt das Simulationsmodell die Anzahl der transportierten TE und berechnet den erreichten aMFS Durchsatz als Anteil vom theoretisch erreichbaren Soll Durchsatz. Der erreichte aMFS Durchsatz liegt in der Regel unter 100%, da es durch die Exponentialverteilung zu Schwankungen bei der Transportauftragsgenerierung kommt.

In Abbildung 10-2 sind die Ergebnisse der durchgeführten Simulationsstudie gezeigt, einmal mit und einmal ohne Optimierung des Ausführungsplans. Der Mittelwert der Konfidenzintervalle liegt bei 1,52 %. Ohne eine Optimierung des Ausführungsplans weisen die Granularitätsstufen den gleichen Durchsatz auf, da alle H-Kreuzungen nur eine TE gleichzeitig transportieren. Insbesondere größere aMFM besitzen die Möglichkeit den Ausführungsplan zu optimieren, wie in Abschnitt 6.3.1 beschrieben. Dadurch steigern aMFM die Auslastung ihrer Arbeitsräume und den Durchsatz, bei gleichzeitiger Einhaltung der TE-Reihenfolge und Vermeidung von Blockaden. Die Auswertung des Simulationslaufs zeigt einen signifikanten Zusammenhang zwischen der Granularitätsstufe und dem erreichbaren Durchsatz in einem aMFS. Die Freiheitsgrade eines aMFM sollten daher so umfangreich wie möglich beschrieben werden, damit im operativen Betrieb eine feingranulare Koordination und Optimierung möglich ist, die zu höheren Durchsätzen führt.

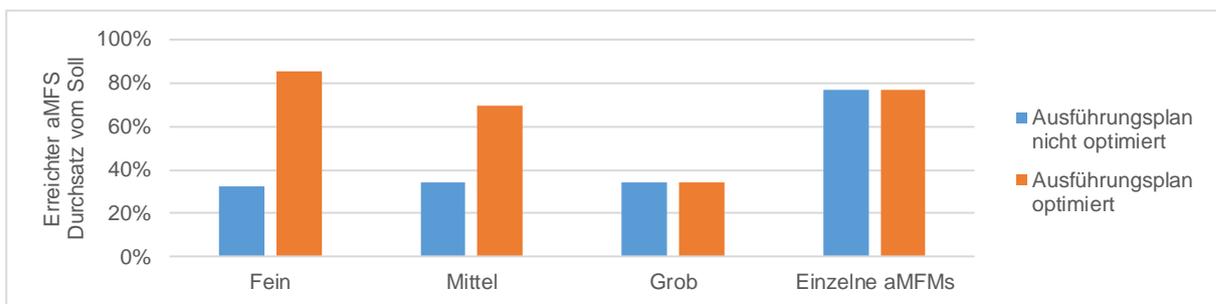


Abbildung 10-2: Erreichter Durchsatz für verschiedene Granularitätsstufen eines aMFM.

Die Verschiebung der LO im Ausführungsplan hat nur einen Effekt, wenn das aMFM aus mehreren Arbeitsräumen besteht, in denen LO unabhängig voneinander koordiniert werden können. Dies ist bei der groben Granularitätsstufe nicht der Fall. Aus je mehr unabhängigen LO ein aMFM besteht, desto größer ist das Optimierungspotential, das sich durch die Verschiebung ergibt. Die erzielte Verbesserung des erreichten Durchsatzes ergibt sich aus der Tatsache, dass der Ausführungsplan aus Schritten besteht, die unabhängig von der Ausführungsdauer einer LO belegt werden. Dadurch sind in einem Ausführungsschritt LO mit unterschiedlich langer Ausführungsdauer vorhanden und die LO mit der längsten Ausführungsdauer bestimmt das Ende eines Ausführungsschritts. Durch die Verschiebung erfolgt eine Entkopplung, wodurch die Arbeitsräume besser ausgelastet werden. Falls ein aMFM keine Optimierung des Ausführungsplans anwendet, sind die erreichten Durchsätze für alle drei Granularitätsstufen vergleichbar. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Funktionsebene neue LO sequentiell am Ende des Ausführungsplans einplant. Hierdurch ergibt sich keine Möglichkeit LO verschiedener TE parallel auszuführen und somit kommt die TE Koordination innerhalb eines aMFM nicht zur Anwendung.

Setzt sich die H-Kreuzung aus unabhängigen aMFM zusammen, erreicht die H-Kreuzung auch ohne eine Optimierung des Ausführungsplans hohe Durchsätze. Die unabhängigen aMFM verhalten sich ähnlich wie die H-Kreuzung der feingranularen Stufe mit Optimierung. Allerdings erzielt die feingranulare Stufe leicht höhere Durchsätze. Die feingranulare H-Kreuzung besitzt sieben Arbeitsräume und kann daher theoretisch sieben TE gleichzeitig transportieren und somit einplanen. Im praktischen Betrieb transportiert die feingranulare H-Kreuzung weniger TE parallel. Falls es zu einer Abweichung zwischen der Planung und der Ausführung kommt, entstehen vor der H-Kreuzung Warteschlangen. Die Warteschlangen sorgen für einen konstanten Arbeitsvorrat, so dass die feingranulare H-Kreuzung besser ausgelastet ist und somit leicht höhere Durchsätze als einzelne aMFM erzielt.

### 10.2.2 Strategische LO-Einplanung

Neben der Möglichkeit LO im Ausführungsplan zu verschieben, besitzt die Funktionsebene noch die Möglichkeit, eine Einplanungsstrategie anzuwenden, die ein Entwickler in der Entwicklungsphase individuell für ein aMFM definiert. Für die Evaluierung wurde ein aMFM vom Typ QVW (vgl. Abbildung 7-3) in einer Simulationsstudie jeweils mit und ohne Einplanungsstrategien verglichen und die Ergebnisse in Abbildung 10-3 aufgetragen. Das mittlere Konfidenzintervall betrug 0,85 %. Die Simulationsstudie weist nach, dass keine Blockaden auftreten, wenn die strategische Einplanung die in Abschnitt 6.3.3 formulierten Grundsätze einhält.

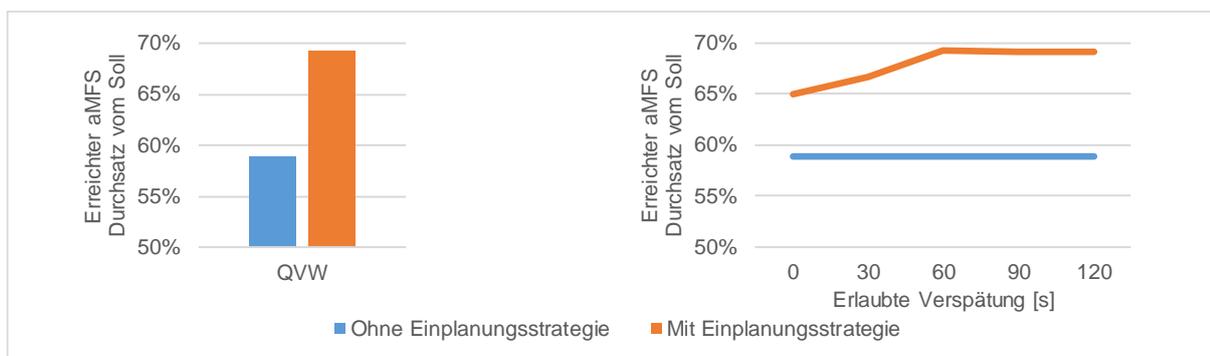


Abbildung 10-3: Erreichter Durchsatz für einen QVW in Abhängigkeit einer Einplanungsstrategie und der erlaubten Verspätung.

Das aMFM vom Typ QVW versucht die Reihenfolge der Transporte so zu planen, dass zwischen Abgabepunkt einer TE und Übernahmepunkt einer nachfolgenden TE eine minimale Distanz liegt. Auch hier gelten die Grundsätze, dass die Reihenfolge an den Ein- und Ausgängen eingehalten werden muss. Das aMFM verfügt über jeweils drei Ein- und Ausgänge. Hierdurch besitzt die Funktionsebene einen strategischen Einplanungsspielraum, da für den nächsten Transport mehr Eingänge zur Auswahl zur Ver-

fügung stehen. Dies spiegelt sich auch im erreichten Durchsatz wider, der bei Anwendung der Einplanungsstrategie um 10 % höher liegt. Grundsätzlich erzielt eine Einplanungsstrategie eine Verbesserung, wenn das aMFM über genügend Einplanungsspielraum verfügt. Der Einplanungsspielraum setzt sich zum einen aus der Anzahl der Eingänge und Ausgänge sowie der Möglichkeit einzelne Transportaufträge vorzuziehen oder zu verzögern zusammen. In Abbildung 10-3 rechts ist der Einfluss der erlaubten Verspätung gezeigt.

Die Festlegung der Ein- und Austrittsreihenfolge an den Ein- und Ausgängen eines aMFM ist Aufgabe einer globalen Materialflussplanung, die aMFM-übergreifende Abhängigkeiten zur Vermeidung von Blockaden berücksichtigt. Ansonsten liegt die aMFM interne Steuerung der Transporte im lokalen Handlungsspielraum eines aMFM. Die Gestaltung eines aMFM legt dabei maßgeblich den Entscheidungsspielraum für lokal getroffene Materialflussentscheidungen fest. Ist der Entscheidungsspielraum groß genug, führen lokale Materialflussstrategien zu einer signifikanten Steigerung des Durchsatzes.

## 10.3 Grundlagen der Routenberechnung

Dieser Abschnitt evaluiert die Grundlagen der Kapazitätsberechnung von aMFM-übergreifenden Transporten. Hierbei steht insbesondere die Kapazitätsberechnung von kritischen Bereichen im Fokus, die bereits stark ausgelastet sind. An dieser Stelle sei noch einmal angemerkt, dass eine exakte analytische Berechnung aufgrund der stochastischen Einflüsse nicht möglich ist. Daher ist das Ziel dieser Arbeit eine Näherung zu liefern, die es ermöglicht, verschiedene kritische Bereiche relativ miteinander zu vergleichen.

### 10.3.1 Berechnung der verfügbaren Kapazität

Die Berechnung der verfügbaren Kapazität erfolgt am Beispiel eines QVW. Ein wesentlicher Bestandteil der Berechnung der verfügbaren Kapazität ist die Berechnung der theoretischen Taktzeit. Der QVW eignet sich als Beispiel, da hier die theoretische Taktzeit von der Verteilung der Materialflussströme abhängt. Die aMFM-individuelle Berechnungsvorschrift zur Berechnung der theoretischen Taktzeit des QVW ist in Abschnitt 7.2.3 beschrieben. An dieser Stelle soll untersucht werden, wie sich die Vereinfachungen bei der Berechnung der verfügbaren Kapazität auf die Ergebnisse auswirken. Es wird der QVW aus Abbildung 10-4 links mit den Eingang-aMFM 4, 5 und 7 sowie den Ausgang-aMFM 1, 2 und 3 betrachtet. Zunächst beliefern alle Eingang-aMFM gleichmäßig alle Ausgang-aMFM. Anschließend steigert das Simulationsmodell

schrittweise die Transportmenge von *aMFM4* nach *aMFM3*, wobei die Transportmengen der anderen Materialflusstrome gleich bleiben (vgl. Abbildung 10-4 rechts). Hierdurch erreicht das aMFM schrittweise seinen Maximaldurchsatz. Das mittlere Konfidenzintervall der Simulationsstudie liegt bei 2,34 %.

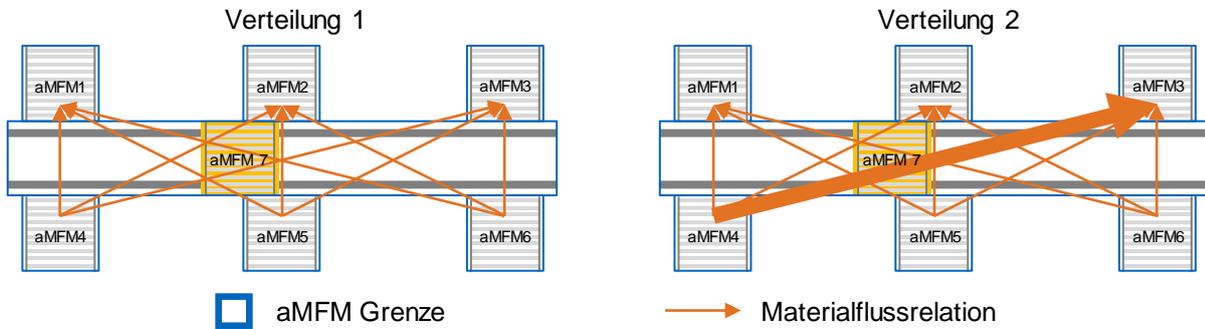


Abbildung 10-4: Verteilung der Materialflusstrome innerhalb des aMFM vom Typ QVW.

In jedem Schritt berechnet das aMFM die maximale Kapazität, die sich aus der aktuell verplanten Kapazität und der berechneten noch verfügbaren Kapazität ergibt. In Abbildung 10-5 ist in Rot der maximal erreichte Durchsatz der betrachteten Verbindung angegeben, der im letzten Schritt der Simulation erreicht wurde und für den galt: *geforderter Durchsatz > erreichter Durchsatz*. Die blaue gestrichelte Linie gibt die maximale Kapazität an, die ohne aMFM-individuelle Berechnungsvorschrift ermittelt wird. Die blaue durchgehende Linie gibt das Ergebnis mit aMFM-individueller Berechnungsvorschrift an.

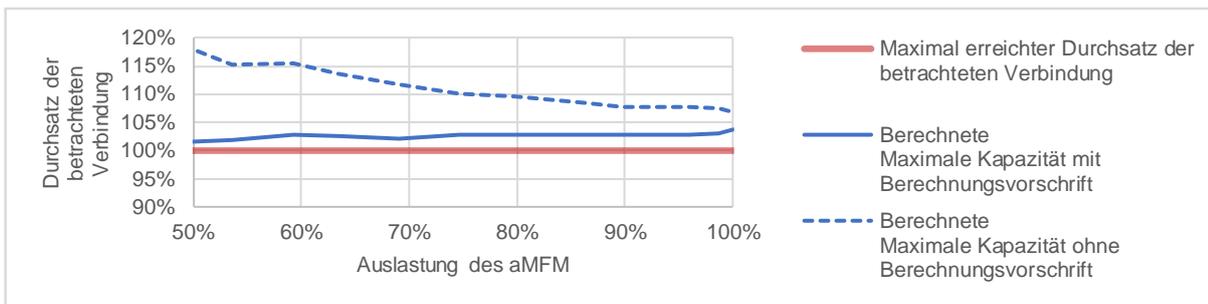


Abbildung 10-5: Vergleich des berechneten maximalen Durchsatzes mit dem erreichten maximalen Durchsatz einer betrachteten Verbindung für verschiedene aMFM-Auslastungen.

Bei einer niedrigen aMFM-Auslastung überschätzt das aMFM die maximal erreichbare Kapazität ohne Berechnungsvorschrift stark. Bei niedrigen aMFM-Auslastungen ergeben sich kürzere Vorbereitungszeiten als bei höheren Auslastungen. Bei höheren Auslastungen steht der QVW mit einer hohen Wahrscheinlichkeit am Ausgang-aMFM 3 und muss dann zu Eingang-aMFM 4. Die Berechnung der maximal erreichbaren Kapazität mit Berechnungsvorschrift berücksichtigt diesen Umstand und liefert somit deutlich genauere Ergebnisse bei niedrigen Auslastungen. In Abschnitt 7.2.3 wird die

aMFM-individuelle Berechnungsvorschrift für einen QVW vereinfacht, indem in der rekursiven Berechnung die berechnete maximal erreichbare Kapazität ohne Berechnungsvorschrift verwendet wird. Die Vereinfachung beeinflusst das Ergebnis kaum, da sich über den gesamten Verlauf der aMFM-Auslastungen ein konstanter Wert für die maximal erreichbare Kapazität mit Berechnungsvorschrift einstellt. Der Einfluss von lokalen Transportabhängigkeiten kann durch aMFM-individuelle Berechnungsvorschriften berücksichtigt werden, wobei bereits vereinfachte Berechnungsvorschriften deutlich bessere Ergebnisse liefern als Berechnungen ohne eine aMFM-individuelle Berechnungsvorschrift.

### 10.3.2 Abhängigkeiten in bB

Die Berechnung der maximalen Kapazität eines bB basiert maßgeblich auf den Gleichungen (7-24) und (7-26). Die nachfolgenden Untersuchungen erfolgen anhand des in Abbildung 10-6 gezeigten bB. Die Transportzeit durch den bB beträgt ca. 35 s. Das mittlere Konfidenzintervall der Simulationsstudie liegt bei 2,45 %.

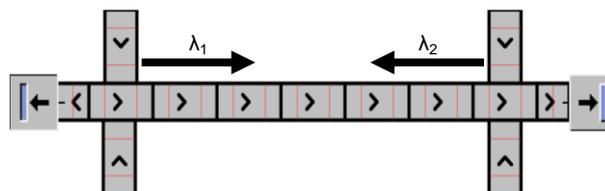


Abbildung 10-6: Im Simulationsmodell abgebildeter bidirektionaler Bereich.

### Berechnung der Auslastung

Zunächst erfolgt die Evaluation von Gleichung (7-24) zur Bestimmung der Auslastung eines aMFM in einem bB. Hierfür betrachtet die Simulationsstudie ein aMFM im bB und bestimmt für verschiedene Durchsatzverhältnisse (Richtung  $\lambda_1$  zu Gegenrichtung  $\lambda_2$ ) jeweils den maximal erreichbaren Durchsatz. Das betrachtete aMFM protokolliert für beide Richtungen die durchschnittliche Blockgröße, den durchschnittlichen Abstand zwischen konsekutiven TE der gleichen Richtung und Transportzeit durch den bB. Daraus berechnet ein aMFM auf Basis von Gleichung (7-24) die theoretische Auslastung. Erreicht das aMFM den maximalen Durchsatz, sollte die theoretische Auslastung bei 100 % liegen. Das Ergebnis der Simulationsstudie ist in Abbildung 10-7 dargestellt. Für alle Durchsatzverhältnisse variiert die berechnete Auslastung in einem engen Korridor um 100 %. Somit ist Gleichung (7-24) geeignet zur Bestimmung der Auslastung.

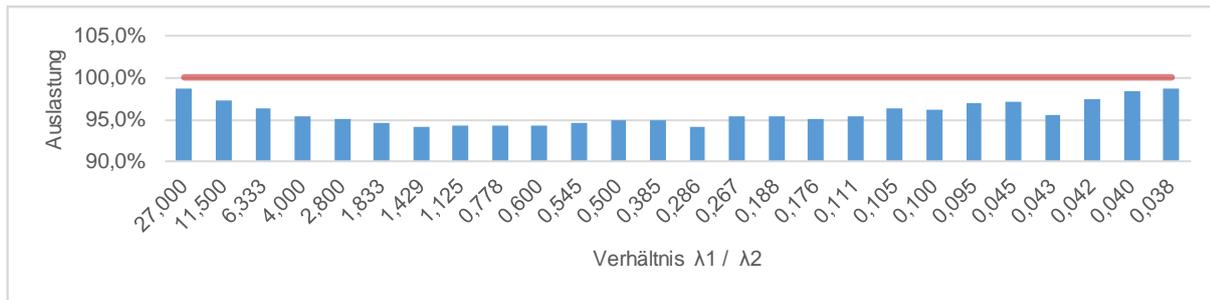


Abbildung 10-7: Mit gemessenen Werten nach Gleichung (7-24) berechnete aMFM Auslastung beim Erreichen der maximalen Kapazität.

### Einfluss des Durchsatzverhältnisses auf den aMFS Durchsatz

Der absolute, maximal erreichte Durchsatz ist in Abbildung 10-8 gezeigt. Es wird deutlich, dass ein gleichmäßiges Durchsatzverhältnis einen negativen Einfluss auf den maximalen Durchsatz hat, da sich für beide Richtungen relativ kleine Blockgrößen einstellen. Bei einer ungleichmäßigen Verteilung nähert sich hingegen eine Richtung der Blockgröße 1 an, während die Blöcke der anderen Richtung sehr groß werden.

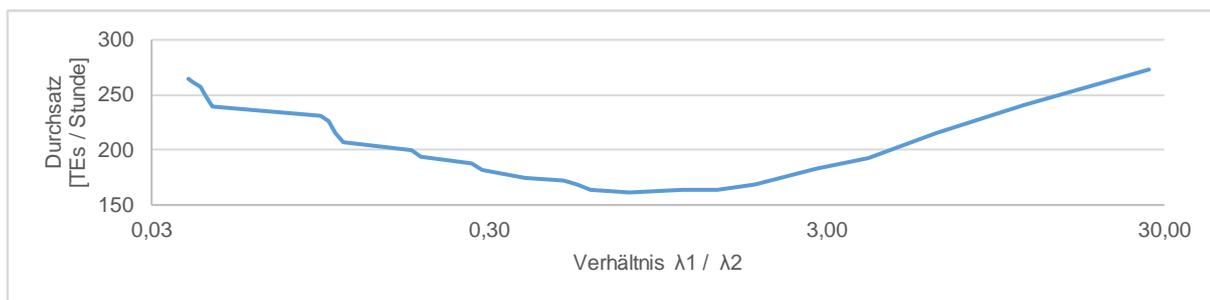


Abbildung 10-8: Maximal erreichter Durchsatz in Relation zum Durchsatzverhältnis.

### Berechnung der maximalen Kapazität einer Verbindung

Im nächsten Schritt erfolgt die Evaluation von Gleichung (7-26) für die Berechnung der maximalen Kapazität einer betrachteten Verbindung. Hierfür wird in Gegenrichtung  $\lambda_2$  (Richtung 2) ein konstanter geforderter Durchsatz vorgegeben und der geforderte Durchsatz der betrachteten Verbindung  $\lambda_1$  (Richtung 1) schrittweise um 10 TE pro Stunde erhöht. Die Simulationsstudie erhöht den Durchsatz  $\lambda_1$ , bis die Summe der geforderten Durchsätze  $\lambda_1$  und  $\lambda_2$  vom erreichten aMFS Durchsatz abweicht. Als Grenzwert wurde eine Abweichung von 5% festgelegt. Bei diesem Verfahren muss berücksichtigt werden, dass der exakte maximale Durchsatz zwischen einer Stufe liegen kann. Bei einem relativen Vergleich ergeben sich daher insbesondere für kleine Durchsätze hohe relative Abweichungen.

Abbildung 10-9 zeigt in Abhängigkeit von der Auslastung der betrachteten Verbindung für drei verschiedene Durchsätze  $\lambda_2$  das Ergebnis der Berechnung der maximalen Ka-

pazität nach Gleichung (7-26). Der maximal erreichbare Durchsatz ist jeweils als konstanter Wert aufgetragen. In die Berechnung fließen dabei für den Abstand zwischen zwei konsekutiven TE derselben Richtung die folgenden Aspekte ein:

- aMFM Taktzeit: Als Abstand fließt die Taktzeit der betrachteten Verbindung in die Berechnung ein.
- Abstand gemessen: Das aMFM misst den Abstand während des Betriebs für die Berechnung. Damit Wartezeiten nicht miteinfließen, die insbesondere bei geringen Auslastungen auftreten, verwendet das aMFM gemessene Abstände erst ab einer festgelegten minimalen aMFM Auslastung.

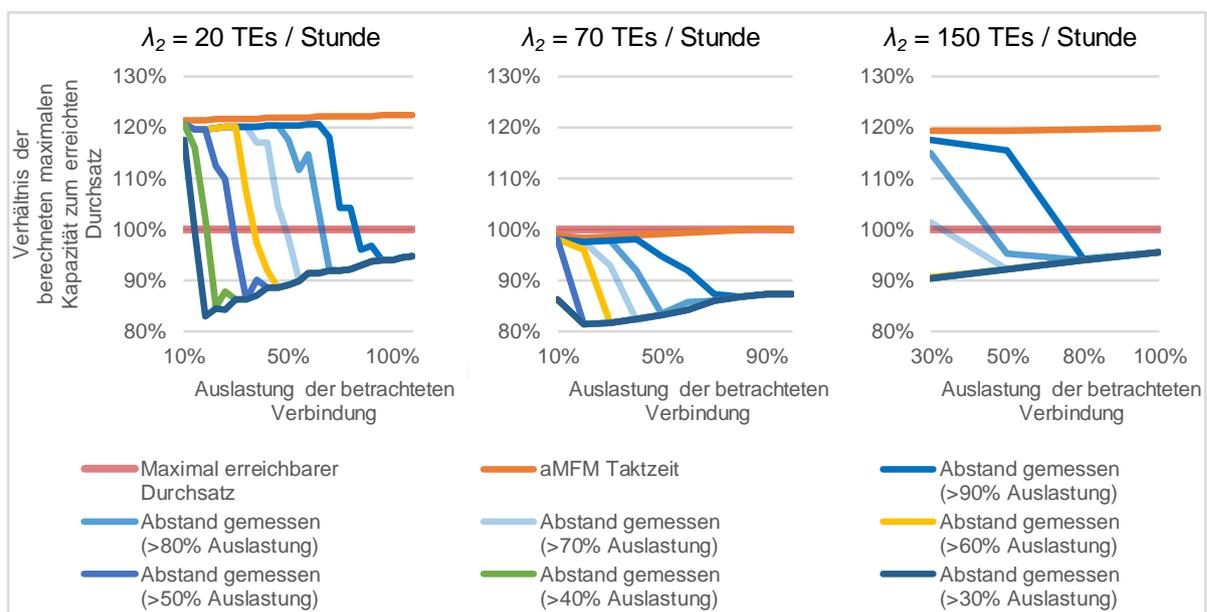


Abbildung 10-9: Ergebnis der Berechnung der maximalen Kapazität eines bB zu verschiedenen Auslastungen der betrachteten Verbindung im Verhältnis zum erreichbaren Durchsatz.

Die Verwendung der Taktzeit liefert einen ersten Schätzwert, der bei höheren Verhältnissen zwischen  $\lambda_1$  und  $\lambda_2$ , wie in Abbildung 10-9 links und rechts gezeigt, über dem maximal erreichten Durchsatz liegt. Der gemessene Abstand liefert genauere Ergebnisse, da dieser Ineffizienzen bei der Einplanung von konsekutiven TE berücksichtigt. Insbesondere in großen aMFS mit einer Vielzahl an Einflüssen auf die Transportplanung, wird es zunehmend unwahrscheinlicher, dass sich die Abstände der Taktzeit der Verbindung annähern. Das Unterschätzen des maximalen Durchsatzes ist darauf zurückzuführen, dass die sich einstellenden Blockgrößen unterschätzt werden. Bei vergleichbaren Verhältnissen zwischen  $\lambda_1$  und  $\lambda_2$  ist der Einfluss des Abstands zwischen zwei konsekutiven TE derselben Richtung geringer, da die durchschnittliche Blockgröße deutlich kleiner ist. Dies lässt sich in Abbildung 10-9 Mitte daran erkennen, dass der Abstand zwischen den Ergebnissen der Taktzeit und den gemessenen Werten

deutlich geringer ist. Die Berechnung mit der Taktzeit und mit den gemessenen Werten unterschätzen beide die sich einstellende Blockgröße. Daher ist es Zufall, dass im gezeigten Beispiel das Ergebnis der Taktzeit mit dem erreichten Durchsatz übereinstimmt. Die Abweichung der berechneten und der sich einstellenden Blockgröße ist darauf zurückzuführen, dass sich auch beim Richtungswechsel Ineffizienzen in der Einplanung ergeben.

Die Genauigkeit der Berechnung mit gemessenen Abständen korreliert mit der Auslastung der betrachteten Verbindung. Wobei bereits bei niedrigen Auslastungen das Ergebnis der Berechnung mit gemessenen Abständen näher am erreichten Durchsatz als das Ergebnis der Berechnung mit der Taktzeit liegt. Daher sollten bevorzugt gemessene Abstände in der Berechnung verwendet werden, sobald hier valide Werte vorliegen.

In Abbildung 10-10 sind für verschiedene Durchsatzverhältnisse die gemessenen Abstände aufgetragen. Für sehr niedrige Durchsatzverhältnisse können keine verlässlichen Abstände gemessen werden, da konsekutive TE derselben Richtung selten auftreten. Daher sollten gemessene Abstände auch erst erfasst werden, wenn die durchschnittliche Blockgröße größer 1 beträgt. Über die verschiedenen Durchsatzverhältnisse hinweg kann kein Trend festgestellt werden, so dass sich die Schwankungen aus stochastischen Einflüssen ergeben. Somit darf der gemessene Abstand für ein Durchsatzverhältnis auch für die Berechnung anderer Durchsatzverhältnisse herangezogen werden. Es sollte daher sichergestellt werden, dass das aFMF für jede Verbindung die Abstände selbst misst und in die Berechnung miteinfließen lässt.

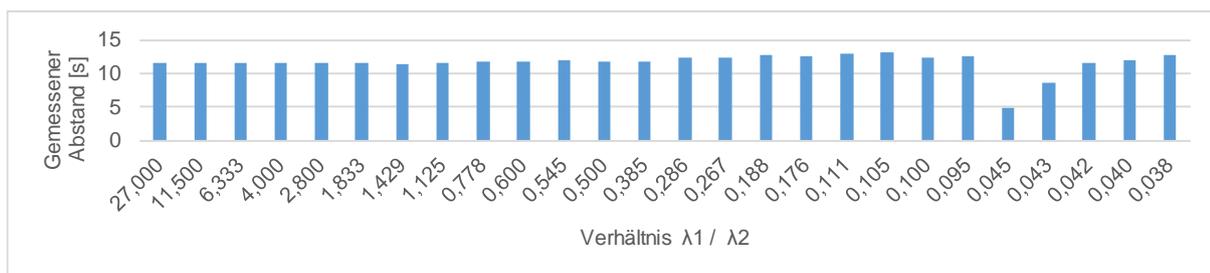


Abbildung 10-10: Gemessene Abstände (> 70% Auslastung) für verschiedene Verhältnisse  $\lambda_1$  zu  $\lambda_2$ .

### Berechnung der maximalen Kapazität für verschiedene Durchsatzverhältnisse

In Abbildung 10-11 ist die Abweichung der Berechnung des maximalen Durchsatzes vom tatsächlich erreichten maximalen Durchsatz für verschiedene Durchsatzverhältnisse gezeigt. Bei extremen Durchsatzverhältnissen weicht die Berechnung im relativen Vergleich Abbildung 10-11 links stärker vom erreichten maximalen Durchsatz ab,

als bei ausgewogenen Durchsatzverhältnissen. Allerdings lässt die absolute Abweichung Abbildung 10-11 rechts darauf schließen, dass der maximal erreichbare Durchsatz zwischen zwei Stufen liegt, wodurch sich die große relative Abweichung relativiert.

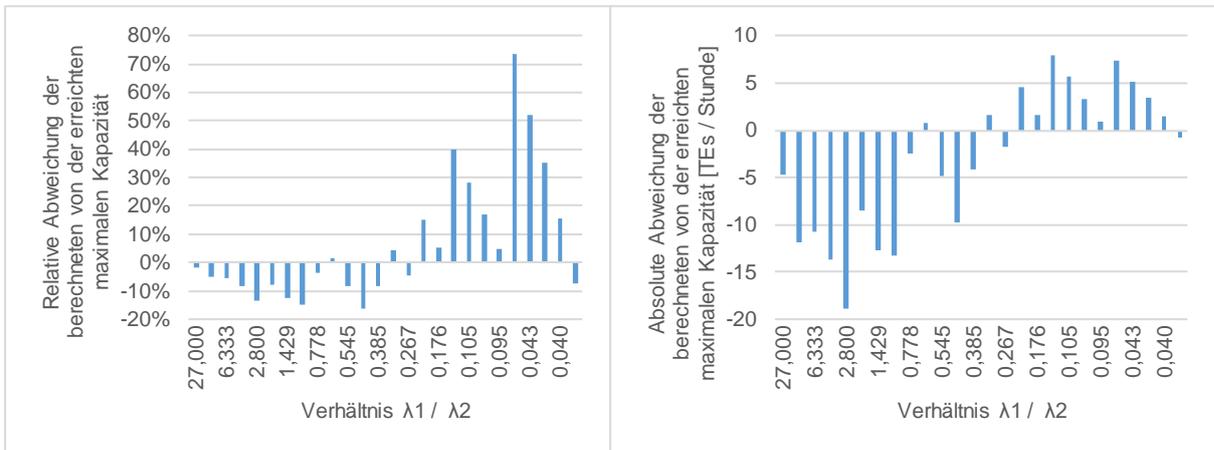


Abbildung 10-11: Relative und absolute Abweichung der berechneten zur erreichten maximalen Kapazität für verschiedene Verhältnisse  $\lambda_1$  zu  $\lambda_2$ .

### Variation der Eigenschaften

Die Eigenschaften wie die Transport- oder Taktzeit von bB können je nach Richtung variieren. Eine weitere Simulationsstudie untersucht daher, ob sich der Berechnungsansatz auch für bB mit unterschiedlichen Eigenschaften für die beiden Richtungen anwenden lässt. Zu diesem Zweck fördern die aMFM zum einen mit einer langsameren Geschwindigkeit, wodurch längere Transport- und Taktzeiten im bB auftreten. Zum anderen fördern die aMFM in Richtung 1 doppelt so schnell wie in Richtung 2. Das mittlere Konfidenzintervall der Simulationsstudie liegt bei 4,51 % und die Ergebnisse der berechneten maximalen Kapazität sind in Abbildung 10-12 aufbereitet.

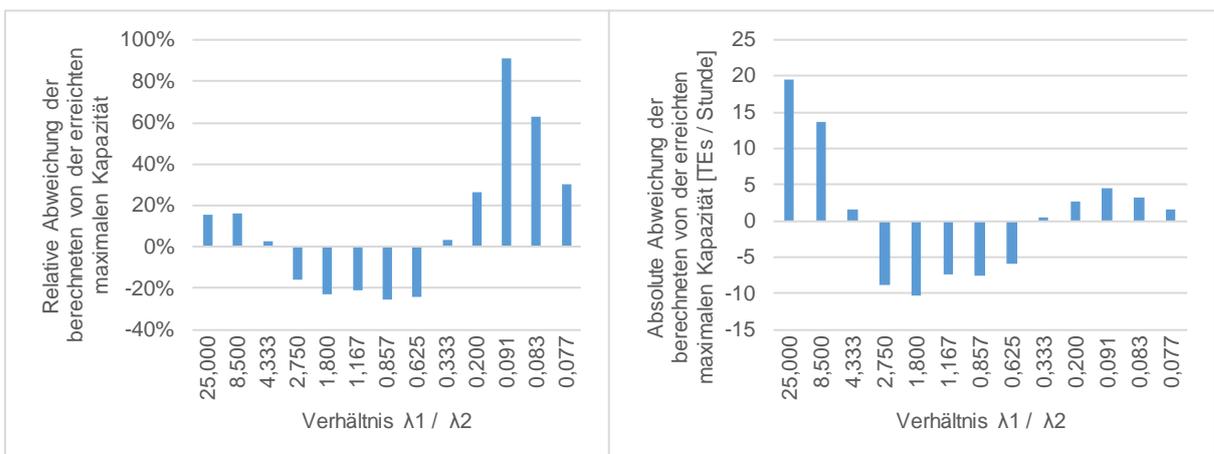


Abbildung 10-12: Relative und absolute Abweichung der berechneten zur erreichten maximalen Kapazität für verschiedene Durchsatzverhältnisse.

Aufgrund der insgesamt reduzierten Fördergeschwindigkeit ist die Spanne der realisierbaren Durchsatzverhältnisse geringer. Insgesamt ergibt sich ein vergleichbares Ergebnis, wie in Abbildung 10-11. Somit ist der Berechnungsansatz auch auf unterschiedlich gestaltete bB übertragbar.

### 10.3.3 Verschachtelte bB

Die Berechnung von verschachtelten bB basiert auf der in dieser Arbeit aufgestellten Annahme, dass die inneren und äußeren bB voneinander unabhängig berechnet werden dürfen. Die höchste so berechnete Auslastung stellt die Auslastung für den gesamten bB dar, wie in 7.3.3 hergeleitet. Die nachfolgende Simulationsstudie untersucht diese Annahme. In der Simulationsstudie ist ein beispielhafter verschachtelter bB abgebildet, der in Abbildung 10-13 gezeigt ist. Das untersuchte aMFS besteht aus einem inneren bB, in dem sich alle Materialflussströme bündeln. Für den äußeren bB stehen drei verschiedene Längen zur Verfügung (Kurz, Mittel, Lang). Zusätzlich kreuzt mittig noch der Materialflussstrom  $\lambda_3$  den bB von oben nach unten.

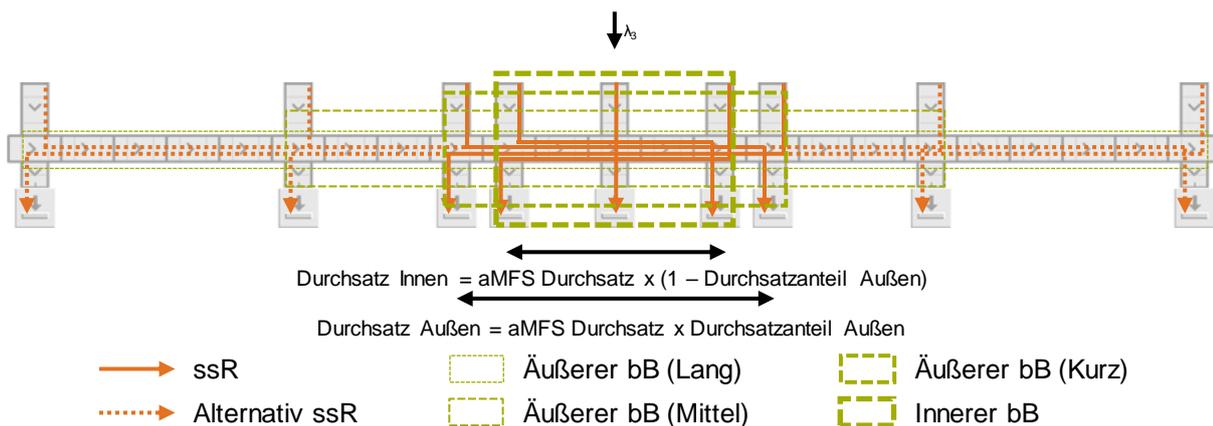


Abbildung 10-13: Mehrfach verschachtelter bB.

In der Simulationsstudie wird für jedes Experiment ein aMFS Durchsatz vorgegeben und der Parameter *Durchsatzanteil Außen* variiert. Der Faktor *Durchsatzanteil Außen* gibt vor, welchen Anteil des aMFS Durchsatzes das aMFS über ssR transportiert, die den äußeren bB aufspannen. Den restlichen Anteil transportiert das aMFS über ssR, die den inneren bB aufspannen. Nachdem sich im inneren bB alle ssR bündeln, entspricht der Durchsatz des inneren bB dem aMFS Durchsatz. Bei einem *Durchsatzanteil Außen* von 0 erfolgen alle Transporte des aMFS ausschließlich durch den inneren bB und bei einem *Durchsatzanteil Außen* von 100% nur im äußeren bB. Das mittlere Konfidenzintervall der Simulationsstudie liegt bei 3,15 %.

Zunächst wird in der Simulationsstudie eine gleichmäßige Verteilung des Durchsatzes in beide Richtungen betrachtet. In Abbildung 10-14 ist für die äußeren bB Kurz, Mittel

und Lang jeweils der erreichte aMFS Durchsatz für verschiedene Werte des *Durchsatzanteils Außen* aufgetragen. Bis zu einem *Durchsatzanteil Außen* von ca. 20% verlaufen die erreichten aMFS Durchsätze nahezu gleich. Somit wird der maximale Durchsatz im inneren bB erreicht, unabhängig davon, wo die im inneren Bereich gebündelten Materialflusstrome, ihren Ursprung haben. Somit ist es möglich, die Auslastung des inneren bB nach Gleichung (7-24) zu berechnen, ohne den Ursprung der Materialflusstrome aus dem äußeren Bereich zu berücksichtigen.

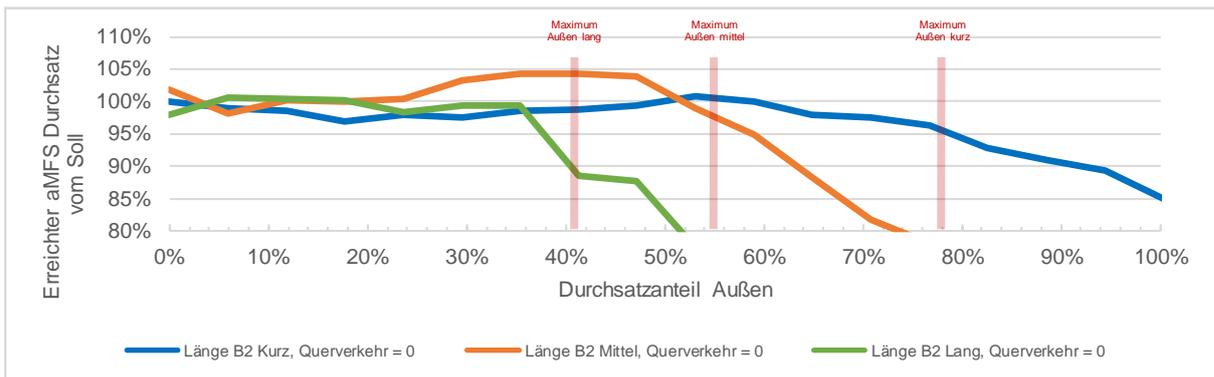


Abbildung 10-14: Verlauf des erreichten aMFS Durchsatzes vom Soll für unterschiedlich lange äußere Bereiche in Abhängigkeit des Durchsatzanteils Außen.

Die senkrechten roten Linien markieren für jeden äußeren bB den maximalen Durchsatz. Für die Ermittlung des maximalen Durchsatzes eines äußeren bB, wird der Durchsatz des inneren bB und des Querverkehrs auf 0 gesetzt. Der erreichte aMFS Durchsatz fällt kurz vor dem Erreichen des maximalen Durchsatzes eines äußeren bB leicht und danach stark ab. Somit besteht im Grenzbereich eine leichte Abhängigkeit zwischen den Materialflusstrome des inneren und äußeren bB. Nachdem die Abhängigkeit sehr gering ist und im bB davor keine Abhängigkeit besteht, ist es möglich, die Auslastung des äußeren bB nach Gleichung (7-24) zu berechnen, ohne die Materialflusstrome im inneren bB zu berücksichtigen.

In der nächsten Simulationsstudie wird der Einfluss des Querverkehrs betrachtet. Die Simulationsergebnisse mit verschiedenen Durchsätzen an Querverkehr sind in Abbildung 10-15 aufgetragen. Der Querverkehr besitzt einen großen Einfluss auf den erreichten aMFS Durchsatz, obwohl das zentrale Kreuzung-aMFM maximal nur zu ca. 60 % mit allen Transporten ausgelastet ist. Arbeiten ssR bereits im Grenzbereich, wie es bei den ssR des inneren und äußeren bB der Fall ist, führen bereits geringe Auslastungen eines aMFM auf der Route dazu, dass die Einplanung und Durchführung von Transporten nicht mehr optimal möglich sind. Ein zentraler Effekt hierbei ist, dass TE vor der Kreuzung kurz warten müssen oder erst später am Start-aMFM starten

dürfen. Neben der reinen Kapazität eines aMFM, beeinflusst noch die Fähigkeit Transporte effizient und mit minimalen Koordinationsverlusten (Warten) einzuplanen den erreichbaren Durchsatz eines aMFS.

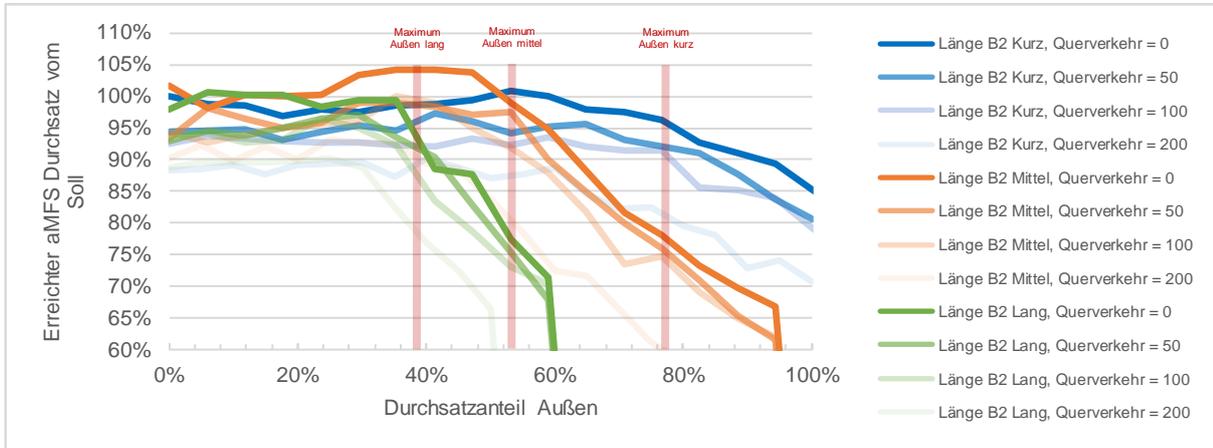


Abbildung 10-15: Verlauf des erreichten aMFS Durchsatzes vom Soll für unterschiedlich lange äußere Bereiche in Abhängigkeit des Durchsatzanteil Außen und Querverkehrs.

Ein aMFM darf die inneren und äußeren bB eines verschachtelten bB separat berechnen, da nur geringe Abhängigkeiten zwischen den Materialflussströmen bestehen. Die Gesamtauslastung eines verschachtelten bB entspricht daher der Auslastung desjenigen bB, der die höchste Auslastung aufweist. In Abbildung 10-16 ist jeweils die berechnete Auslastung des inneren und äußeren bB aufgetragen. Die berechnete Auslastung des inneren bB liegt konstant bei um die 60 %, da sich hier alle Materialflussströme bündeln. Im Fall von niedrigen *Durchsatzanteilen Außen* ist die Auslastung des inneren bB maßgeblich für die Gesamtauslastung des verschachtelten bB. Bei höheren *Durchsatzanteilen Außen* bestimmen die äußeren bB die Auslastung des verschachtelten bB.

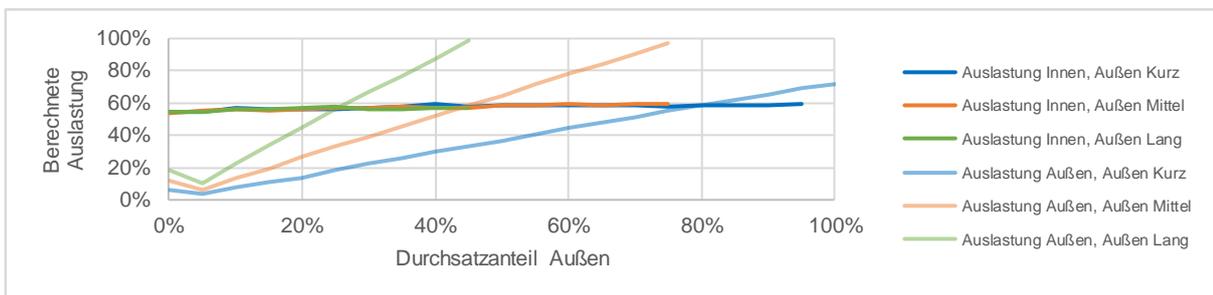


Abbildung 10-16: Berechnete Auslastung des inneren und äußeren bB.

Die Materialflussströme eines aMFS beeinflussen die Belegzeiten von aMFM. In diesem Fall besteht eine gegenseitige Abhängigkeit zwischen den Transporten und ein Einfluss auf die Leistungsfähigkeit. Als deutlich relevanter einzustufen ist allerdings der

Effekt von bB. In bB besteht eine große Abhängigkeit zwischen Transporten und ausschließlich ein negativer Einfluss auf die Leistungsfähigkeit. bB beeinflussen die Leistungsfähigkeit in Abhängigkeit ihrer Länge, der Auslastung und dem Durchsatzverhältnis der Richtungen. Aufgrund der großen Abhängigkeit zwischen Transporten sollte eine Routenberechnung bB daher umfänglich berücksichtigen.

## 10.4 Routenberechnung

Der vorangegangene Abschnitt evaluierte die aMFM-übergreifenden Abhängigkeiten zwischen Transporten und die in dieser Arbeit hergeleiteten Berechnungsvorschriften. Dieser Abschnitt evaluiert die Anwendung der Berechnungsvorschriften im Rahmen der Routenberechnung.

### 10.4.1 Routenberechnung mit verschachtelten bB

Für die Routenberechnung in aMFS mit verschachtelten bB wurde in dieser Arbeit das Konzept der Verschachtelungsmatrix in 7.3.3 eingeführt. Dem Konzept der Verschachtelungsmatrix liegt die Annahme zu Grunde, dass sich die inneren und äußeren Bereiche eines verschachtelten bB unabhängig voneinander berechnen lassen. Die Evaluation im vorangegangenen Abschnitt bestätigte die Annahme, so dass nun die Evaluation der Anwendung im Rahmen der Routenberechnung folgt.

Das Konzept der Verschachtelungsmatrix überschätzt tendenziell die Auslastung von verschachtelten bB bei ungünstigen Materialflussströmen. Um diesen Effekt zu untersuchen, wurde das Konzept der Verschachtelungsmatrix in den Dijkstra Algorithmus integriert und eine Simulationsstudie konzipiert. Die Simulationsstudie greift wieder auf das Layout in Abbildung 10-13 zurück und stellt ein Szenario mit ungünstigen Materialflussströmen dar. Die Verschachtelungsmatrix ermittelt die längsten und größten gegenläufigen Materialflussströme. Falls mehrere Materialflussströme in ungünstigen Konstellationen in einen bB ein- und austreten, ermittelt die Verschachtelungsmatrix einen zu langen bB und zu große gegenläufige Materialflussströme. Eine solche ungünstige Konstellation ist in Abbildung 10-17 gezeigt.

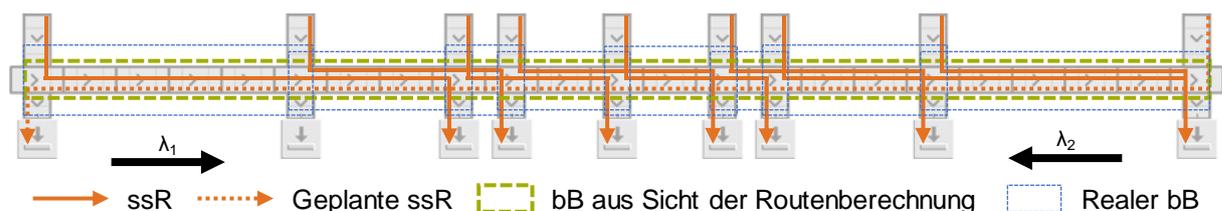


Abbildung 10-17: Ungünstige Konstellationen an Materialflussströmen für die Routenberechnung mit einer Verschachtelungsmatrix.

Anstatt mehrere unabhängige kurze bB zu berechnen, identifiziert die Verschachtelungsmatrix im Dijkstra Algorithmus einen langen bB und berechnet für diesen die Auslastung, bei der Einplanung einer ssR von rechts nach links (Richtung 2). In einer Simulationsstudie wird für jede ssR in Richtung 1 der gleiche Durchsatz festgelegt. Nach einer Einschwingphase plant das aMFS eine ssR in Richtung 2 ein. Die Routenberechnung berechnet auf Basis des Dijkstra Algorithmus mit integrierter Verschachtelungsmatrix die zukünftige Auslastung und schreibt diese mit. Das Experiment wiederholt sich mit schrittweise steigenden Durchsätzen in Richtung 2. Die Ergebnisse in Abbildung 10-18 zeigen, dass die Routenberechnung die Auslastung bei einer ungünstigen Konstellation an Materialflussströmen deutlich überschätzt. Der maximal erreichbare Durchsatz in Richtung 2 liegt bei ca. 80 TE pro Stunde. Für diesen Wert ergibt auch die Berechnung der aMFM mit gemessenen Werten eine Auslastung von 100 %. Das mittlere Konfidenzintervall der Simulationsstudie liegt bei 2,27 %.

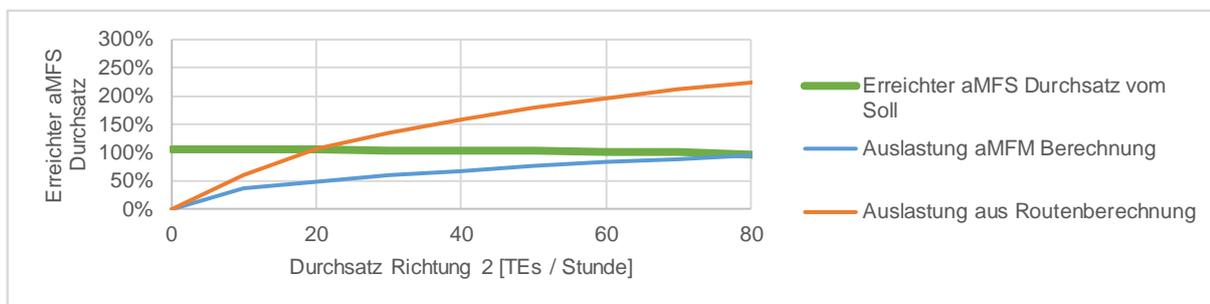


Abbildung 10-18: Vergleich der von der Routenberechnung berechneten und realen aMFS Auslastung für eine ungünstige Konstellation an Materialflussströmen.

Der Effekt des Überschätzens ist in der Theorie nicht zu vernachlässigen. Allerdings handelt es sich beim obigen Beispiel um eine extrem ungünstige Konstellation. Dazu kommt, dass die Routenberechnung die ssR in Richtung 2 auch noch als letzte ssR einrichtet. In einer weiteren Simulationsstudie wird daher das Auftreten solcher extremen Konstellationen mit gleichzeitigem Überschätzen in größeren aMFS untersucht.

Die Simulationsstudie bildet ein aMFS im Stile eines sogenannten Manhattan Layouts ab, wie in Abbildung 10-19 gezeigt. Das Manhattan Layout besteht ausschließlich aus Quellen, Senken, bidirektionalen Förderbändern und Kreuzungen. Der Vorteil des Manhattan Layouts liegt darin, dass es viele Möglichkeiten für die Bildung von bB bietet. Daher stellt das Manhattan Layout ein Extremszenario für die Bildung von bB in aMFS dar. In 1.000 Experimenten generiert die Simulationsstudie jeweils zufällige Materialflussrelationen zwischen den Quellen und Senken sowie einem geforderten Durchsatz. Die Simulationsstudie hält für jedes Experiment die maximal berechnete Auslastung während einer Routenberechnung, den geforderten und den erreichten aMFS Durchsatz fest.

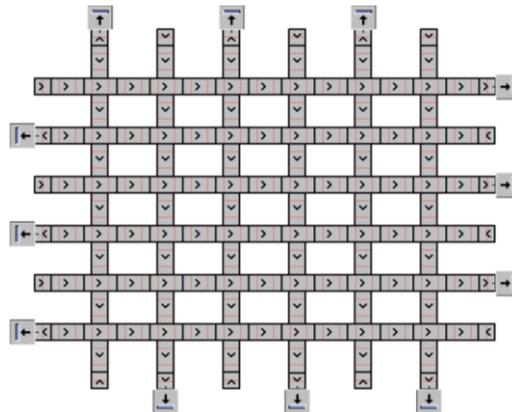


Abbildung 10-19: aMFS im Stile eines Manhattan Layouts.

Das mittlere Konfidenzintervall der Simulationsstudie liegt bei 0,77 % und die Ergebnisse sind in Abbildung 10-20 gezeigt. In der Simulationsstudie wurde in 34 % der Experimente der geforderte Durchsatz bewältigt (Datenpunkte rechts von der y-Achse in Abbildung 10-20). Für diese Experimente ermittelte die Routenberechnung eine Auslastung, die bis auf wenige Ausnahme deutlich unter 100 % liegt. Das Überschätzen von  $b_B$  im Rahmen der Routenberechnung besitzt somit keinen praxisrelevanten Einfluss. Neben dem Überschätzen führt auch das Unterschätzen der Auslastung zu Ungenauigkeiten in der Planung. Eine Unterschätzung liegt vor, wenn die berechnete Auslastung kleiner als 100 % beträgt, aber der erreichte Durchsatz vom geforderten aMFS Durchsatz negativ abweicht (Datenpunkte links von der y-Achse in Abbildung 10-20). Es liegt zwar ein klarer Trend zwischen der Abweichung des erreichten Durchsatzes vom geforderten Durchsatz und der maximal berechneten Auslastung aus der Routenberechnung vor, aber unterschätzte Routenberechnungen stellen keine Einzelfälle dar. Dies gilt insbesondere für geringe Abweichungen des erreichten vom geforderten Durchsatz.

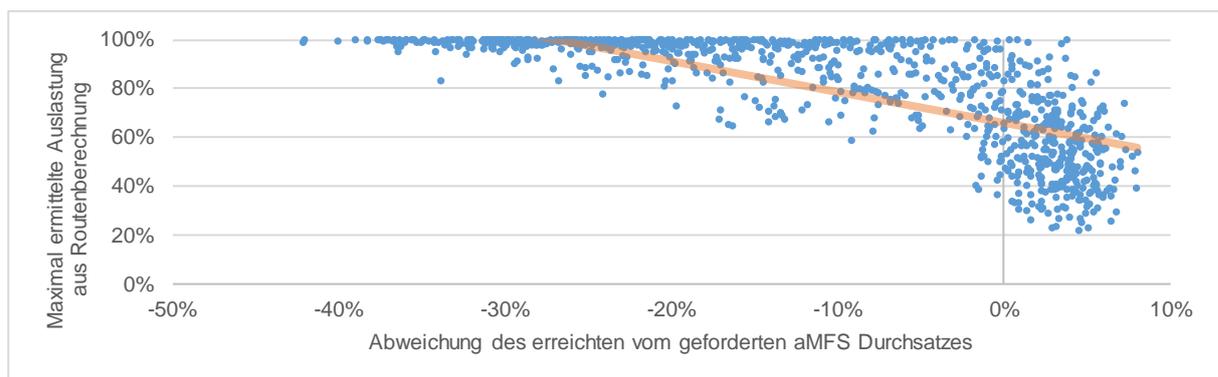


Abbildung 10-20: Maximal berechnete Auslastung aus der Routenberechnung in Relation der Abweichung des erreichten Durchsatzes vom geforderten aMFS Durchsatz mit linearer Trendlinie in orange.

Insgesamt bietet die Routenberechnung daher nur einen Orientierungswert für die spätere Auslastung des aMFS. Eine detaillierte Berechnung ist nicht möglich, da insbesondere in komplexen Systemen mit vielen voneinander abhängigen Routen Einflüsse bestehen, die nicht exakt berechnet werden können. Einer dieser Einflüsse besteht beispielsweise darin, dass die Einplanung von Transporten nicht immer kontinuierlich möglich ist, sondern andere kreuzende Transporte abwarten müssen. Diese Einflüsse sind abhängig vom Layout des aMFS, vom Verlauf der ssR, der Anzahl der kreuzenden ssR, dem Durchsatz und weiteren Faktoren. Diese zusätzlichen Einflussfaktoren machen eine exakte Berechnung nicht möglich, beziehungsweise sehr komplex. Allerdings ermöglicht die in dieser Arbeit vorgestellte Berechnung eine Abschätzung der sich einstellenden Auslastung und vor allem eine Vergleichbarkeit zwischen Routenalternativen in der Planungsphase. Der weitere Verlauf der Arbeit zeigt, dass der relative Vergleich von Routenalternativen bereits zu deutlichen Verbesserungen bei der Routenplanung führt und ist für den vorliegenden Anwendungsfall zunächst ausreichend.

#### 10.4.2 Routenberechnung und Auswahl

Die in dieser Arbeit eingeführten Berechnungsmethoden sollen einen Vergleich zwischen verschiedenen Routenalternativen ermöglichen. Auf Basis des Vergleichs wählt das Start-aMFM eine Routenalternative aus. Zunächst untersucht eine Simulationsstudie das grundsätzliche Verhalten der Routenauswahl mit den aMFS aus Abbildung 10-21.

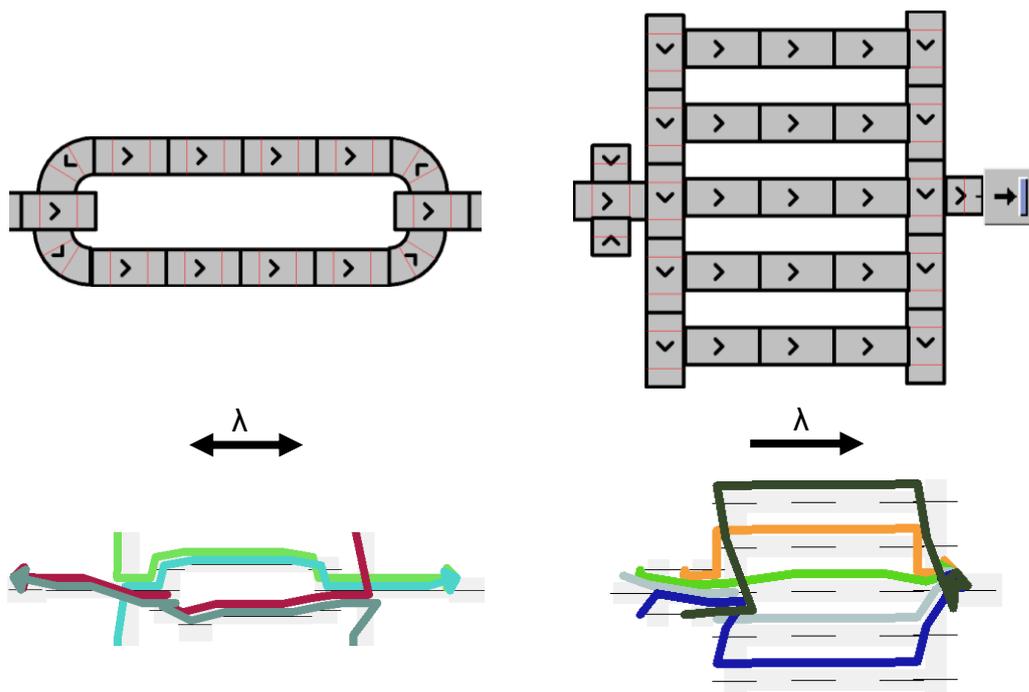


Abbildung 10-21: Zwei beispielhafte aMFS und die Verteilung der ssR auf die Alternativstrecken.

Im aMFS links treten TE sowohl links als auch rechts in das aMFS ein und werden jeweils zur anderen Seite gefördert. Um den maximalen Durchsatz zu erreichen, sollte das aMFS jeweils ssR mit der gleichen Richtung auf einer Strecke bündeln. In der Simulation trat dieses Verhalten auf, somit ist die Routenauswahl in der Lage, gegenläufige Verkehre - falls möglich - zu vermeiden. Im aMFS rechts werden TE nur von links nach rechts gefördert und es stehen mehrere Alternativstrecken zur Verfügung. Die Alternativstrecken besitzen aufgrund einer geringeren Geschwindigkeit eine niedrigere Kapazität als die Zu- und Abfuhrstrecken. Das aMFS sollte die ssR gleichmäßig auf die Alternativstrecken aufteilen, um Überlastungen auf einer Strecke zu vermeiden. In der Simulation trat dieses Verhalten wiederum auf, somit ist die Routenauswahl in der Lage Verkehr auf das aMFS zu verteilen.

Die beiden oben genannten Beispiele stellen noch keinen Beweis dar, dass die Routenauswahl auch in komplexen Systemen die erwarteten Ergebnisse liefert. Eine weitere Simulationsstudie untersucht daher die Auswahl der Routen auf Basis des Manhattan Layouts aus Abbildung 10-19. Die Materialflussrelationen und Soll-Durchsätze werden wiederum in jedem Experiment zufällig generiert, wodurch sich ein mittleres Konfidenzintervall von 2,16 % für die Simulationsstudie ergibt. In der Simulationsstudie wählt das aMFS Routen auf Basis unterschiedlicher Kriterien aus, richtet die ssR ein und ermittelt den erreichten Durchsatz. Die Verfahren zur Routenberechnung basieren alle auf dem Dijkstra Algorithmus. Die Routenauswahl variiert die Restriktionen nach folgenden Kriterien:

1. Keine Restriktionen: Auswahl der kürzesten Route ohne Berücksichtigung von Kapazitäten.
2. aMFM-Kapazität: Auswahl der kürzesten Route unter Berücksichtigung der aMFM-Kapazitäten.
3. aMFM und bidirektionale Kapazität: Auswahl der kürzesten Route unter Berücksichtigung der aMFM und effektiven Kapazitäten in bB.
4. aMFM und bidirektionale Kapazität mit Umwegen: Berücksichtigung der aMFM und effektiven Kapazitäten in bB und der Möglichkeit zur Auswahl einer längeren Route mit geringerer effektiver Kapazität als kürzeste Route.

Das Ergebnis der Simulationsstudie ist in Abbildung 10-22 gezeigt. Den geringsten Durchsatz erreicht die Auswahl alleine nach dem Kriterium kürzeste Route. Die Berücksichtigung der aMFM-Kapazitäten führt schon zu Verbesserungen und die zusätzliche Betrachtung der bB zu einer deutlichen Steigerung des erreichten Durchsatzes. Die höchsten Durchsätze erreicht das aMFS, wenn das aMFS Umwege in Kauf nimmt, um hierfür im Gegenzug die effektive Kapazität in kritischen Bereichen zu reduzieren.

Die Simulationsstudie erbringt somit den Nachweis, dass die in dieser Arbeit hergeleiteten Berechnungsvorschriften eine valide Basis liefern, um den voraussichtlichen Durchsatz von Routen bereits in der Planungsphase zu vergleichen und Routen auszuwählen, die einen positiven Einfluss auf den erreichbaren Durchsatz besitzen.

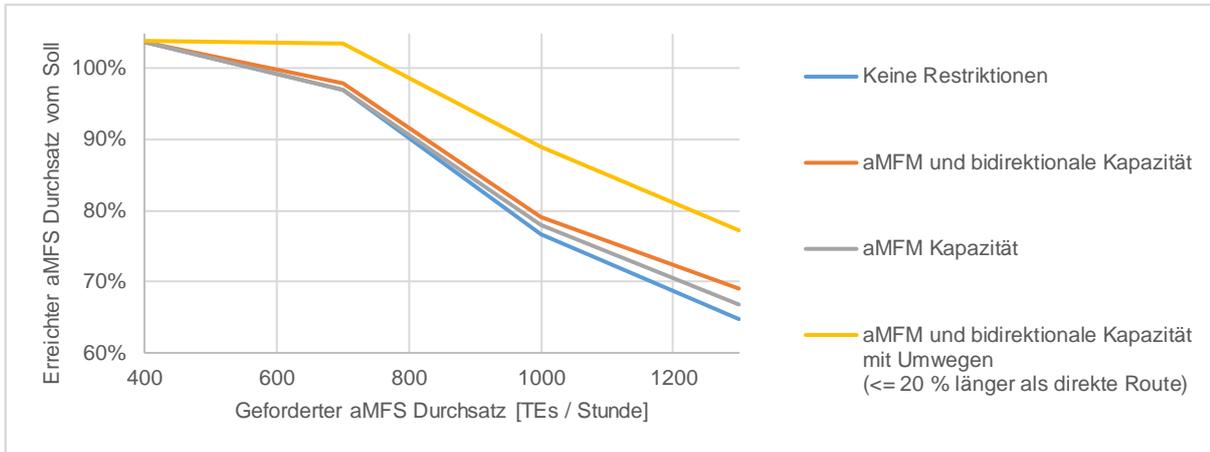


Abbildung 10-22: Vergleich des erreichten Durchsatzes zum geforderten Durchsatz für verschiedene Routenauswahlverfahren und aMFS Durchsätze.

Die Routenauswahl erzielt die besten Ergebnisse, wenn das aMFS Umwege zulässt. Die Länge des erlaubten Umwegs kann das aMFS dabei als Parameter vorgegeben. Eine weitere Simulationsstudie untersucht den Einfluss der Länge des erlaubten Umwegs. Als aMFS wird wiederum ein Manhattan Layout in zwei verschiedenen Größen verwendet, wobei das größere Layout aus 50 % mehr Quellen und Senken sowie 135 % mehr aMFM als das kleinere Layout besteht. Die Materialflussrelationen und Durchsätze werden wiederum zufällig generiert und das mittlere Konfidenzintervall liegt bei 4,77 %. In Abbildung 10-23 ist der erreichte Durchsatz für verschiedene erlaubte Längen des Umweges gezeigt.

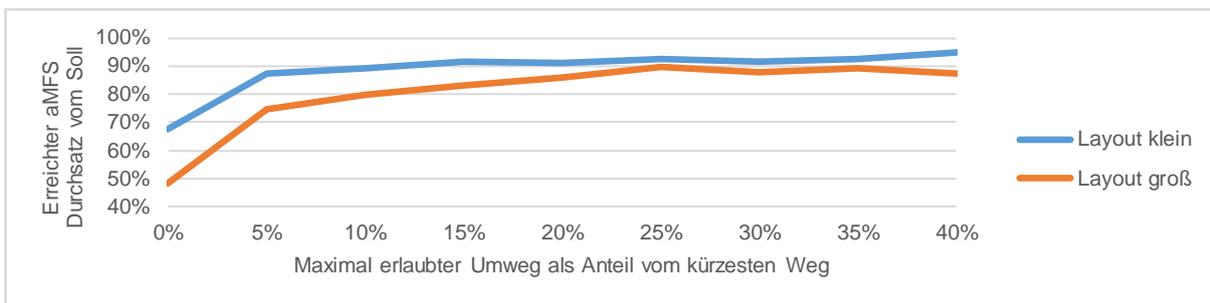


Abbildung 10-23: Erreichter Durchsatz für verschiedene erlaubte Längen des Umweges.

Bei 0 % ist kein Umweg erlaubt und der erreichte Durchsatz entspricht der Routenauswahl mit aMFM und bidirektionaler Kapazität. Bei 40 % darf die neue Route mit redu-

zierter effektiver Kapazität bis zum Faktor 1,4 länger sein. Schon bei geringen Umwegen lässt sich der erreichte Durchsatz deutlich steigern. Längere Umwege haben hingegen keinen positiven Effekt mehr. Auch in einem größeren Layout besitzt ein größerer erlaubter Umweg keinen positiveren Effekt mehr.

### 10.4.3 Optimierung

Die Optimierung von aMFM bietet sich an, um für schrittweise eingeplante ssR Alternativen zu prüfen und umzusetzen. In Abbildung 10-24 links ist ein Szenario gezeigt, bei dem ssR zwischen zwei Pfaden wählen können, um das Ziel zu erreichen. Der eine Pfad ist deutlich länger als der andere Pfad. Der für die Routenberechnung erlaubte Umweg reicht nicht aus, so dass die Routenberechnung eine ssR über den längeren Pfad führt, solange noch Kapazität im kürzeren Pfad vorhanden ist.

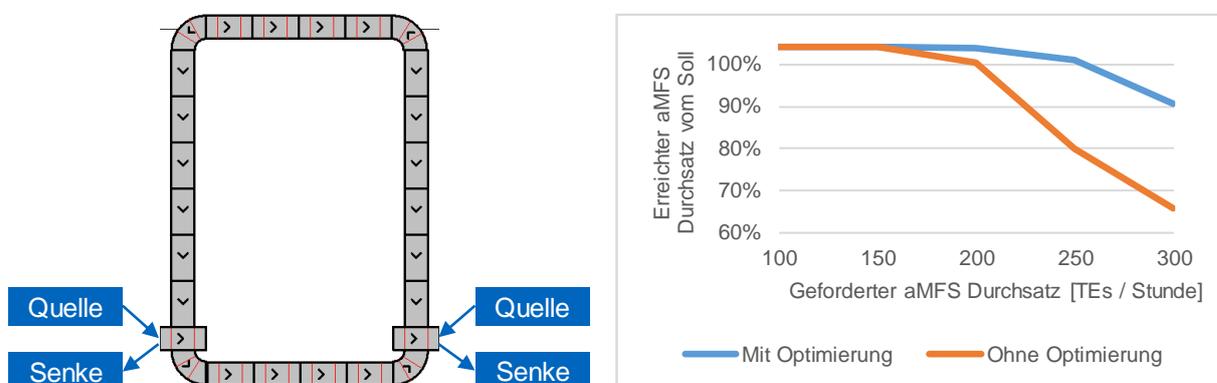


Abbildung 10-24: Anwendung einer Optimierung an einem Beispiellayout.

Kommt der untere Pfad an seine Kapazitätsgrenze legt die in 8.3.3 beschriebene Optimierung eine Vorzugsrichtung fest und sagt alle ssR ab, die nicht der Vorzugsrichtung entsprechen. Hierdurch werden in aMFS, die im Grenzbereich arbeiten, längere Transportzeiten von ssR in Kauf genommen, um im Gegenzug den Durchsatz zu steigern. Durch das schrittweise Einplanen von ssR kann zusätzlich der Fall auftreten, dass trotz ausreichend erlaubtem Umweg ssR in derselben Richtung auf beiden Ästen eingeplant werden, wenn noch keine ssR in Gegenrichtung eingeplant sind. Die Anwendung der Strategie führt zu einer signifikant höheren Durchsatzleistung des aMFS, wie die Ergebnisse der Simulationsstudie in Abbildung 10-24 rechts mit einem mittleren Konfidenzintervall von 6,07 % zeigen.

Eine weitere Simulationsstudie untersucht das Verhalten der Optimierung in komplexen aMFS Layouts, um vor allem auch negative Effekte auszuschließen. Dabei steht auch die Häufigkeit von Optimierungen im Fokus. Zum einen definiert ein aMFS global, in welchen Abständen eine Optimierung stattfindet (aMFS Abstand), und zum anderen lokal, in welchen Abständen eine Optimierung auf demselben aMFM zulässig ist

(aMFM Abstand). Die Simulationsstudie untersucht die Einflüsse in einem Manhattan Layout mit einem mittleren Konfidenzintervall von 3,49 %. Die Ergebnisse sind in Abbildung 10-25 gezeigt.

Auch in komplexen aMFS Layouts besitzt die Optimierung einen positiven Einfluss. Die globale Festlegung einer Mindestdauer zwischen Optimierungen beeinflusst den Durchsatz dabei nicht signifikant. Dies deutet darauf hin, dass die positiven Effekte bereits nach den ersten Optimierungsdurchläufen eintreten und weitere Optimierungsdurchläufe keinen großen Effekt mehr haben. Die lokale Festlegung einer Mindestdauer zwischen Optimierungen desselben aMFM besitzt ebenfalls keinen signifikanten Einfluss auf den Durchsatz. Der untersuchte Optimierungsalgorithmus erhält von den aMFM eine Rückmeldung, in welchem Umfang ein aMFM im Rahmen der Optimierung ssR geändert hat. Falls keine Änderungen durchgeführt wurden, stößt der Koordinator eine Optimierung auf einem anderen aMFM an. Hierdurch zeigt eine Mindestdauer zwischen Optimierungen auf demselben aMFM keine Wirkung mehr.

|              |       | aMFS Abstand |       |       |       |
|--------------|-------|--------------|-------|-------|-------|
|              |       | 0 h          | 0,5 h | 1 h   | 1,5 h |
| aMFM Abstand | 0 h   | 14,9%        | 15,9% | 15,3% | 14,5% |
|              | 0,5 h | 14,9%        | 15,9% | 15,3% | 14,5% |
|              | 1 h   | 14,9%        | 16,0% | 15,3% | 14,5% |
|              | 1,5 h | 14,8%        | 15,9% | 15,3% | 14,5% |

Abbildung 10-25: Optimierung in einem Manhattan Layout.

Auf Basis der in dieser Arbeit hergeleiteten Berechnungsvorschriften ist es einer Routenberechnung möglich, aMFM-übergreifende Abhängigkeiten zwischen Transporten zu identifizieren und zu vergleichen. Durch den relativen Vergleich von verschiedenen Routenalternativen ist die Routenberechnung in der Lage kritische Bereiche zu identifizieren und negative Abhängigkeiten zwischen Transporten bereits in der Planungsphase zu vermeiden. Die Reduzierung von negativen Abhängigkeiten durch die geeignete Auswahl von Routen für ssR oder Optimierung, führt insgesamt zu einer Steigerung des aMFS Durchsatzes.

## 10.5 Koordination

Diese Arbeit adaptiert die zeitenfensterbasierte Reservierung für die Anwendung von ssR in aMFS. Dieser Abschnitt führt die Evaluation der adaptierten zeitenfensterbasierten Reservierung durch.

### 10.5.1 Reservierungsverfahren

Eine Simulationsstudie mit einem mittleren Konfidenzintervall von 3,20 % evaluiert anhand des Manhattan Layouts zunächst die Einplanung von Reservierungen auf einem aMFM. Zur Auswahl stehen folgende Verfahren:

- **Fest:** aMFM übergeben den Eintrittszeitpunkt an das Vorgänger-aMFM. Das Vorgänger-aMFM prüft, ob der gewünschte Eintrittszeitpunkt bedient werden kann.
- **Frühester Eintrittszeitpunkt:** aMFM übergeben einen gewünschten und einen frühesten Eintrittszeitpunkt an das Vorgänger-aMFM. Das Vorgänger-aMFM prüft, ob der gewünschte oder ein alternativer Eintrittszeitpunkt, der zwischen dem gewünschten und frühesten liegt, bedient werden kann.
- **Parallelreservierung auf Kreuzungen:** Anwendung der zeitfensterbasierten Reservierung mit frühestem Eintrittszeitpunkt und lokaler Parallelreservierung auf Kreuzungen, wenn TE auf Vorgänger-aMFM warten können.

In Abbildung 10-26 ist für die verschiedenen Verfahren zum einen der erreichte Durchsatz und zum anderen die durchschnittliche Anzahl an Reservierungsversuchen bis zu einer erfolgreichen Einplanung aufgetragen. Die Anzahl an Reservierungsversuchen sagt aus, wie viele Reservierungsanfragen im Schnitt pro Transport gestartet werden, bis eine erfolgreiche Reservierungsbestätigung auf dem Start-aMFM eintrifft.

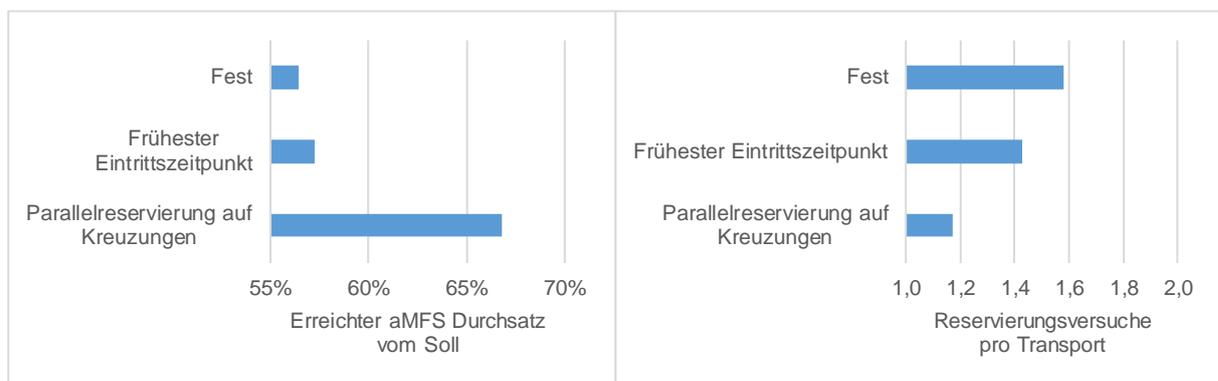


Abbildung 10-26: Erreichter Durchsatz und durchschnittliche Anzahl an Reservierungsversuchen pro Transportauftrag für verschiedene Reservierungsverfahren.

Es ist zu erkennen, dass die Zeitfensterreservierung mit Parallelreservierung auf Kreuzungen den höchsten Durchsatz erzielt und auch die geringste Anzahl an Versuchen für die Einplanung einer neuen Reservierung benötigt. Daher eignet sich das Verfahren der Parallelreservierung auf Kreuzungen am besten für ssR in aMFS.

### 10.5.2 Berechnung und Auswahl der Reservierungsintervalle

Für die Auswahl eines Startzeitpunktes werden zunächst die eingeplanten Reservierungen der beteiligten aMFM mit Hilfe von diskretisierten Zeiträumen (Intervallen) abgefragt. Sowohl die Intervalllänge als auch der Betrachtungszeitraum entscheiden maßgeblich über die Größe der ausgetauschten Nachrichten und den erzielbaren Durchsatz. Eine Simulationsstudie untersuchte den Einfluss der Intervalllänge und des Betrachtungszeitraums mit einem Mittelwert der Konfidenzintervalle von 3,41% für den Durchsatz. Die Intervalllänge ist dabei auf allen aMFM gleich. In Abbildung 10-27 links sind die Ergebnisse für den erreichten aMFS Durchsatz aufgetragen.

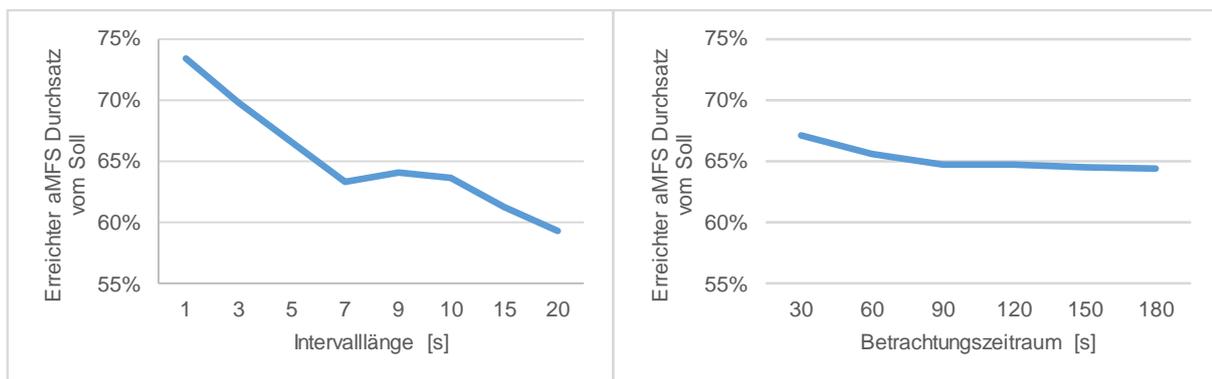


Abbildung 10-27: Einfluss der Intervalllänge und des Betrachtungszeitraums auf den Durchsatz.

Die Intervalllänge besitzt einen starken Einfluss auf den Durchsatz, da mit kürzeren Intervallen Transporte präziser zwischen bereits bestehende Transporte eingeplant werden. Der Einfluss des Betrachtungszeitraums ist gering, wie in Abbildung 10-27 rechts gezeigt. Bei einem kurzen Betrachtungszeitraum ist das aMFS gezwungen einen nahen Startzeitpunkt für den Transport zu wählen, wohingegen bei einem langen Betrachtungszeitraum ein Startzeitpunkt weit in der Zukunft ausgewählt werden kann. Hierdurch ist das Start-aMFM im Durchschnitt länger blockiert und nachfolgende TE müssen ggf. warten, wodurch der aMFS Durchsatz leicht beeinträchtigt wird.

Ein weiteres Kriterium für die Festlegung der Intervalllänge und des Betrachtungszeitraums stellt die Anzahl an Reservierungsversuchen dar. In Abbildung 10-28 sind die Reservierungsversuche aufgetragen. Kurze Intervalle benötigen tendenziell weniger Reservierungsversuche, da sie den Systemzustand genauer abbilden. Bei sehr kurzen Intervallen steigt die Anzahl an Versuchen allerdings leicht an, da hier wenig Toleranz für kleine Änderungen besteht. Der Betrachtungszeitraum verfügt über einen deutlichen Einfluss auf die Anzahl der Versuche. Bei einem kurzen Betrachtungszeitraum ist die Auswahl an Startzeitpunkten eingeschränkt und somit muss mitunter ein suboptimaler Startzeitpunkt ausgewählt werden. Ein suboptimaler Startzeitpunkt erhöht

die Wahrscheinlichkeit, dass die Reservierungsbestätigung nicht erfolgreich ist und der Reservierungsvorgang wiederholt werden muss.

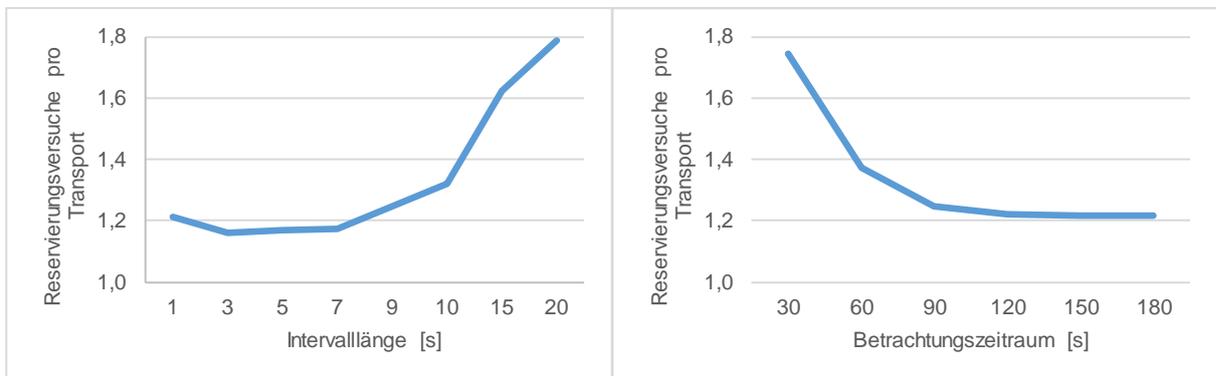


Abbildung 10-28: Einfluss der Intervalllänge und des Betrachtungszeitraums auf die Anzahl der durchschnittlichen Reservierungsversuche pro Transport.

Die Intervallkapazität wird entweder mit der durchschnittlichen Auslastung des Intervalls auf der Route angegeben oder mit der minimalen Kapazität, die auf der Route auftritt. Bei der Verwendung eines Durchschnittswertes bekommen insbesondere lange Routen, die nur kurz durch stark belastete Bereiche führen in der Regel ihren Wunschstartzeitpunkt zugewiesen. Wohingegen kurze Routen, die viel durch stark befahrene Bereiche führen, exakt eingeplant werden und somit als Lückenfüller agieren. Allerdings kann es lokal zu starken Überlastungen kommen, wodurch die Wahrscheinlichkeit von nicht erfolgreichen Reservierungsbestätigungen steigt. In Abbildung 10-29 sind die Ergebnisse für den Durchsatz und die Reservierungsversuche aufgetragen als Ergebnis einer Simulationsstudie mit dem mittleren Konfidenzintervall für den Durchsatz von 3,18%. Die Angabe der minimalen Intervallkapazität führt zu höheren Durchsätzen und weniger Reservierungsversuchen und ist daher zu bevorzugen.

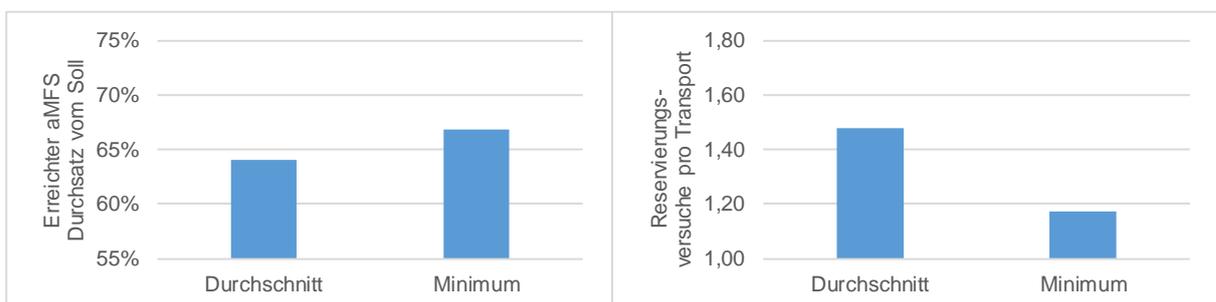


Abbildung 10-29: Vergleich der durchschnittlichen mit der minimalen Kapazität für die Berechnung der Intervallkapazitäten.

Für die Auswahl eines Startzeitpunktes stehen verschiedene Strategien zur Verfügung, die in einer Simulationsstudie mit dem mittleren Konfidenzintervall des Durchsatzes von 3,20% ermittelt wurden und deren Ergebnis in Abbildung 10-30 aufgetragen

ist. Den höchsten Durchsatz erreicht das aMFS, wenn es pauschal immer das erste Intervall auswählt. Hierbei ist die Verweilzeit auf den Start-aMFM minimal. Allerdings führt dieser Ansatz zu vielen fehlgeschlagenen Reservierungsbestätigungen. Die Auswahl eines Intervalls mit ausreichend Kapazität nach dem frühesten Startzeitpunkt oder mit der größten Kapazität stellt hingegen einen Kompromiss zwischen dem erreichbaren Durchsatz und der Anzahl an Reservierungsversuchen und damit der Nachrichtenlast im aMFS dar.

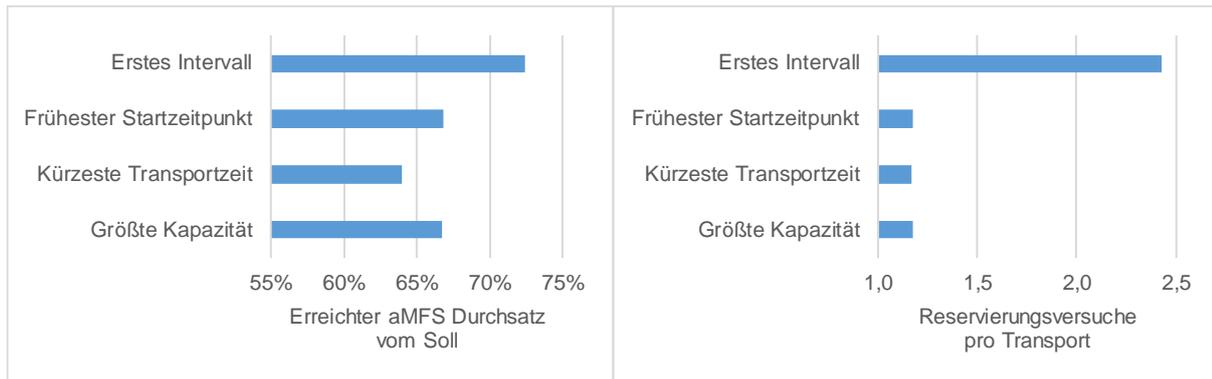


Abbildung 10-30: Vergleich verschiedener Auswahlstrategien für ein Startintervall mit dem Durchsatz und den Reservierungsversuchen.

Die Routenberechnung ist in der Lage, aMFM-übergreifende Abhängigkeiten zwischen Transporten auf einer strategischen Ebene zu reduzieren. Die Einplanung koordiniert hingegen Abhängigkeiten auf der operativen Ebene. Die Einplanung verfügt über einen großen Handlungsspielraum mit signifikantem Einfluss auf die Leistungsfähigkeit eines aMFS. Daher spielt die Ausgestaltung der Einplanung eine wichtige Rolle in aMFS.

# 11 Zusammenfassung und Fazit

---

## 11.1 Zusammenfassung

Die Logistik ist zunehmend mit der Herausforderung konfrontiert, dynamisch auf wechselnde Anforderungen zu reagieren und Tätigkeiten stärker zu automatisieren. Konventionelle automatisierte Materialflusssysteme kommen hierbei an ihre Grenzen, da insbesondere die Struktur und der Entwicklungsprozess der Steuerung auf langfristig konstante Anforderungen ausgelegt sind. Eine Antwort auf diese Herausforderungen stellen adaptive Systeme dar, für die es sowohl in der Domäne Produktion als auch Logistik bereits Ansätze gibt. Adaptive Systeme bestehen aus einzelnen Modulen, die über individuelle Fähigkeiten verfügen. Die Module sind in der Lage selbstständig Funktionen auszuführen, mit anderen Modulen zu kommunizieren und Entscheidungen zu treffen. Betreiber fügen die Module nach den aktuellen Bedürfnissen zu einem System zusammen und ändern das System bei Bedarf wieder. Neu hinzugefügte Module melden sich automatisch im System an und führen eine automatische Inbetriebnahme durch. Während der Betriebsphase führen Module Aufgaben entweder eigenständig oder in Kooperation mit anderen Modulen aus.

In adaptiven Produktionssystemen steht dabei der Abgleich zwischen den Anforderungen eines Produktes und den Fähigkeiten der Module im Mittelpunkt sowie die Kooperation zwischen verschiedenen Modulen. Das Pendant bilden in der Logistik aMFS, die sich hingegen auf die Vermeidung von Blockaden und die verteilte Ausführung von Strategien konzentrieren. Mit zunehmender Systemgröße nehmen in aMFS die Abhängigkeiten zwischen einzelnen Transporten zu und beeinflussen die Leistungsfähigkeit. Für die Leistungsfähigkeit eines aMFS und der Module spielt auch die Reihenfolge der Transporte eine entscheidende Rolle. Die bestehenden Ansätze für aMFS berücksichtigen den Einfluss der Transportabhängigkeiten auf die Leistungsfähigkeit bisher nicht. Auch in adaptiven Produktionssystemen bestehen Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Aufträgen, die über dieselben Module (z. B. Maschinen) laufen. Allerdings kommt bei aMFS zusätzlich hinzu, dass ein Auftrag (Transport) kontinuierlich über mehrere Module ausgeführt wird und nicht außerhalb eines Moduls (z. B. Teilepuffer einer Maschine) zwischengepuffert werden kann. Diese Arbeit betrachtet daher systematisch die Einflussfaktoren der Transportabhängigkeiten auf die Leistungsfähigkeit und bewertet diese. Auf dieser Basis beantwortet die Arbeit folgende Forschungsfrage:

*Wie kann eine Steuerung für aMFS lokale und globale gegenseitige Abhängigkeiten zwischen Transporten berücksichtigen und somit die Leistungsfähigkeit des aMFS steigern?*

Für die Beantwortung und insbesondere Evaluation der Forschungsfrage bedarf es einer Steuerung für aMFS. Im Rahmen dieser Arbeit wird daher eine Referenzsteuerung für aMFS entwickelt, die exemplarisch Transportabhängigkeiten berücksichtigt. Zu Beginn definiert die Arbeit Anforderungen an die Systemarchitektur, Gestaltung und Steuerung der Module und Materialflusssteuerung eines aMFS.

Die Definition eines Moduls erfolgt in dieser Arbeit in Anlehnung an Vorarbeiten und wird als aMFM bezeichnet. Jedes aMFM verfügt über einen eigenen Steuerungsagenten, der mit den Agenten der anderen aMFM kooperiert und ein Multi Agentensystem bildet. Die aMFM Agenten gliedern sich dabei in mehrere hierarchischen Ebenen. Im Gegensatz zu bestehenden Systemen verfügt das aMFS zusätzlich über eine zentrale Koordinator-Instanz, die für einen effizienten und konsistenten Informationsaustausch sorgt.

Die aMFM bilden die Bausteine eines aMFS. Die Gestaltung der aMFM hat daher einen großen Einfluss auf das Verhalten und somit die Leistungsfähigkeit eines aMFS. In Abhängigkeit des Typs (Querverschiebewagen, unidirektionaler Bandförderer, etc.) und der Gestaltung (Freiheitsgrade) eines aMFM bestehen lokale Transportabhängigkeiten innerhalb eines aMFM. Diese Arbeit betrachtet daher die Einflussfaktoren und Koordination von lokalen Transportabhängigkeiten in den Phasen Entwicklung, Inbetriebnahme und Betrieb eines aMFM. Die Betrachtung der Entwicklungsphase zeigt, dass Entwickler durch die Modellierung und Definition der Freiheitsgrade die spätere Basis für die lokalen Transportabhängigkeiten im Betrieb legen. Die Betrachtung der Inbetriebnahmephase zeigt die Konsequenzen, die in der Entwicklungsphase getroffenen Entscheidungen, für die Konfiguration eines aMFM in einem neuen oder geänderten aMFS. Die Entwicklungs- und Inbetriebnahmephase legen somit die Ursachen für die lokalen Transportabhängigkeiten fest, die ein aMFM im Betrieb koordiniert. Die Berücksichtigung von lokalen Transportabhängigkeiten ist dabei Aufgabe der aMFM internen Koordination. Zu diesem Zweck definiert diese Arbeit zunächst den lokalen Entscheidungsspielraum für die interne Materialflusssteuerung eines aMFM, so dass die globale Materialflusssteuerung hiervon nicht beeinträchtigt wird. Anschließend entwickelt diese Arbeit ein Konzept für eine aMFM-interne Materialflusssteuerung zur Transportkoordination. Hierbei handelt es sich um einen allgemeingültigen Ansatz, der für verschiedene aMFM Typen und Anzahl an Freiheitsgraden verwendet werden kann.

Aufgrund der hohen Dynamik in einem aMFS, stellt die Planung von Routen eine besondere Herausforderung dar. Telekommunikationsnetzwerke unterliegen ebenfalls einer hohen Dynamik und sind mit der Herausforderung schon wesentlich länger konfrontiert. Diese Arbeit adaptiert das MPLS Routingverfahren, das Telekommunikationsnetzwerke neben anderen Verfahren einsetzen und damit feste Routen in einem Netzwerk einrichten, für aMFS. ssR bilden die Grundlage, um lokale und globale Transportabhängigkeiten bereits in der Planungsphase zu berücksichtigen. Die Routenberechnung verwendet Transportzeiten und Kapazitäten der einzelnen aMFM, um zum einen kürzeste Routen zu finden und zum anderen den Verkehr gleichmäßig im aMFS zu verteilen. Die Transportzeiten und Kapazitäten sind in einer Topologie hinterlegt. Die Berechnung der Topologie ist abhängig vom aMFM-Typ und der Konfiguration im aMFS. Diese Arbeit leitet zum einen allgemeine Berechnungsformeln für die Topologieeigenschaften her und entwickelt zum anderen Berechnungsvorschriften, um aMFM-individuelle Berechnungsformeln in der Entwicklungsphase zu erstellen.

In aMFS beeinflussen bB, in denen bidirektionale Transporte ohne eine Ausweichmöglichkeit stattfinden, die Leistungsfähigkeit stark. Die Ermittlung der Leistungsfähigkeit von bB unterliegt einer Vielzahl an stochastischen Einflüssen. Diese Arbeit entwickelt ein Modell und Berechnungsgrundlagen, um die Leistungsfähigkeit in vereinfachter Form anzunähern. In diesem Zusammenhang werden auch die unterschiedlichen Ausprägungen der bB und deren Einfluss auf die Leistungsfähigkeit diskutiert. Zusätzlich liefert die Arbeit einen Ansatz das hergeleitete Modell und die Berechnungsgrundlagen in den Dijkstra Algorithmus für die Routenberechnung zu integrieren, um somit bereits in der Planungsphase Transportabhängigkeiten zu berücksichtigen.

Nach der Herleitung der Modelle und Berechnungsgrundlagen zur Berücksichtigung von lokalen und globalen Transportabhängigkeiten beschäftigt sich das anschließende Kapitel mit der Integration in die Steuerung eines aMFS. Im Fokus steht hier unter anderem das Vorgehen, um neue ssR in ein aMFS einzuplanen. ssR bieten eine stabile Basis zur Optimierung des Verkehrs in aMFS. Um diese Eigenschaft zu demonstrieren, zeigt diese Arbeit auch ein Vorgehen zur Optimierung von bestehenden ssR. Durch eine geeignete Routenplanung reduzieren aMFS Transportabhängigkeiten. Die Koordination von Transporten sorgt anschließend dafür, dass die Steuerung noch bestehende Transportabhängigkeiten bei der Ausführung berücksichtigt. Hierfür greift diese Arbeit auf die bereits bewährte zeitenfensterbasierte Reservierung zurück, adaptiert das Verfahren für den Einsatz mit ssR und identifiziert verschiedene Gestaltungsparameter.

Diese Arbeit leitet verschiedene Modelle und Berechnungsgrundlagen für die Berücksichtigung von lokalen und globalen Transportabhängigkeiten her, die letztendlich in

der Planung von Routen und der Koordination von Transporten integriert sind. Hierfür stellt diese Arbeit diverse Hypothesen auf und trifft Annahmen, um die Komplexität zu reduzieren. Ein Simulationsmodell evaluiert daher die Modelle und Berechnungsgrundlagen.

## 11.2 Fazit

Zunächst steht die Gestaltung von aMFM im Vordergrund und die interne Koordination von Transportabhängigkeiten. Ein wesentlicher Effekt der internen Koordination auf die Leistungsfähigkeit konnte nur bei aMFM mit mehreren Ein- und Ausgängen festgestellt werden. Ansonsten ist der Effekt nur marginal, da die globalen Materialflussentscheidungen den lokalen Einplanungsspielraum stark einschränken.

Insbesondere bei komplexen aMFM beeinflussen lokale Transportabhängigkeiten die Topologieeigenschaften. Daher untersucht eine Simulation die aMFM-individuelle Berechnungsvorschrift am Beispiel eines QVW. Die Berechnungsformeln wurden dabei auf Basis der in dieser Arbeit definierten Berechnungsvorschrift erstellt. Ohne eine aMFM-individuelle Berechnungsvorschrift gleicht sich die berechnete maximal erreichbare Kapazität erst bei hohen aMFM-Auslastungen an den erreichbaren Durchsatz an. Bei Verwendung einer aMFM-individuellen Berechnungsvorschrift kann bereits bei niedrigen aMFM-Auslastungen die maximal erreichbare Kapazität genauer bestimmt werden. Trotz Vereinfachungen ist die Erstellung einer Berechnungsvorschrift für ein aMFM komplex. Daher sollten aMFM-individuelle Berechnungsvorschriften nur für aMFM-Typen erstellt werden, bei denen lokale Transportabhängigkeiten einen großen Einfluss besitzen. Dies ist bei aMFM-Typen der Fall, bei denen sich die Beleg- und Taktzeiten stark je nach Kombination Eingang- zu Ausgang-aMFM unterscheiden. Dies ist z. B. bei einem QVW und Drehtisch der Fall, wenn die Fahr- beziehungsweise Drehzeiten bei der Ermittlung der Beleg- und Taktzeiten nicht vernachlässigbar sind.

Bei globaler Betrachtung ist der Einfluss der lokalen Transportabhängigkeiten gering. Somit sind für die Leistungsfähigkeit eines aMFS maßgeblich die Materialflussentscheidungen mit Berücksichtigung der globalen Transportabhängigkeiten relevant. Diese Erkenntnis stellt den Aufwand für die Erstellung von aMFM-individuellen internen Optimierungsstrategien und Berechnungsvorschriften in Frage.

bB entstehen durch globale Transportabhängigkeiten und haben einen großen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit eines aMFS. Globale Transportabhängigkeiten geben dabei die Parameter eines bB wie z. B. die Länge oder das Durchsatzverhältnis der beiden Förderrichtungen vor. Die Ermittlung der Werte für die Parameter und deren

Einfluss auf das Berechnungsergebnis sind unter anderem Gegenstand einer Simulationsstudie. Das in dieser Arbeit entwickelte Modell und die Berechnungsgrundlagen nähern den in der Simulation erreichten Durchsatz um ca.  $\pm 20\%$  an, mit Ausnahmen in extremen Situationen, deren Relevanz in diesem Kontext diskutiert wird. In komplexen Szenarios sind mehrere bB ineinander verschachtelt. Eine Simulationsstudie erbringt den Nachweis, dass auch in solchen Situationen die entwickelten Modelle und Berechnungsgrundlagen gültig sind. Mit Hilfe einer zusätzlichen Theorie lassen sich sogar die Kapazitäten für solche verschachtelten bB annähern. Eine exakte Berechnung des Einflusses von bB auf die Leistungsfähigkeit eines aMFS ist auch bei isolierter Betrachtung aufgrund der stochastischen Einflüsse und vorgenommenen Vereinfachungen bei den Berechnungsgrundlagen nicht möglich. Allerdings bilden die Berechnungen Trends ab und erlauben somit einen relativen Vergleich des Einflusses verschiedener bB auf die Leistungsfähigkeit eines aMFS.

In weiteren Simulationsstudien steht die Evaluation der Routenberechnung im Fokus. Die Routenberechnung ist in die Referenzsteuerung, die im Rahmen dieser Arbeit entwickelt wurde, integriert und berücksichtigt Transportabhängigkeiten nach den in dieser Arbeit abgeleiteten Modellen und Berechnungsgrundlagen. Hier erfolgt der Nachweis, dass die Berücksichtigung von Transportabhängigkeiten in der Planungsphase von ssR zu signifikanten Verbesserungen der Leistungsfähigkeit führt. Somit erzielt bereits ein relativer Vergleich von Routenalternativen Verbesserungen. Wird die Routenplanung darüber hinaus in die Lage versetzt Umwege zuzulassen und bB, die im relativen Vergleich negativ abschneiden, zu umgehen, ist nochmals eine deutliche Verbesserung der Leistungsfähigkeit des aMFS festzustellen. bB werden in der Routenplanung nur isoliert betrachtet. Allerdings beeinflussen verschiedene unabhängige bB auf einer Route auch die Leistungsfähigkeit einer ssR und damit des aMFS. Daher unterschätzt die Berechnung die Auslastung eines aMFS oftmals, da solche Effekte nicht abgebildet werden.

Die in dieser Arbeit entwickelten Modelle und Berechnungsgrundlagen schaffen die Grundlagen für Optimierungen. aMFM sind in der Lage kritische Bereiche zu identifizieren und im aMFS miteinander zu vergleichen. Auf dieser Basis ist es möglich an geeigneten aMFM effektive Optimierungsmaßnahmen wie z. B. die Einrichtung von Einbahnstraßen umzusetzen. Eine online-Optimierung führt vor allem in einfachen Systemen zu signifikanten Verbesserungen der Leistungsfähigkeit eines aMFS.

Für die effiziente Koordination von Transport durch die zeitfensterbasierte Reservierung sind einige Anpassungen notwendig, die abschließend evaluiert werden. Durch die ssR kommt es zu Einschränkungen bei der zeitfensterbasierten Reservierung und

zur Förderung von globalen Transportabhängigkeiten. Durch das Zulassen von parallelen Reservierungen auf ausgewählten Kreuzungspunkten kann der Einfluss der globalen Transportabhängigkeiten auf die Leistungsfähigkeit eines aMFS reduziert werden. Allerdings kann dadurch nicht die Flexibilität der zeitfensterbasierten Reservierung ohne Vorgaben von Routen erreicht werden. In aMFS mit zahlreichen Routenalternativen sowie vielen wechselnden und schwankenden Materialflussrelationen ist daher ein dynamisches Routing mit zeitfensterbasierter Reservierung zu bevorzugen. In solchen aMFS stellen sich keine konstanten globalen Transportabhängigkeiten ein, die durch ssR vermieden werden könnten. Stattdessen schränken ssR nur die zeitfensterbasierte Reservierung ein und wirken somit kontraproduktiv.

Insgesamt lässt sich feststellen, dass aufgrund der stochastischen Einflüsse, eine exakte Berechnung der Topologieeigenschaften (Kapazität und Transportzeit) unter Berücksichtigung von lokalen und globalen Transportabhängigkeiten nicht oder nur mit einem sehr hohen Aufwand möglich ist. Diese Arbeit schafft daher zunächst ein tiefergehendes Verständnis für die Einflussfaktoren von Transportabhängigkeiten. Hierdurch ermöglicht die Arbeit die Herleitung von Modellen und Berechnungsgrundlagen für Transportabhängigkeiten, die eine vergleichsweise einfache Annäherung der Einflüsse der Transportabhängigkeiten auf die Leistungsfähigkeit eines aMFS ermöglichen. Zusätzlich erfolgt im Rahmen dieser Arbeit die Entwicklung einer Referenzsteuerung für aMFS, um die hergeleiteten Modelle und Berechnungsgrundlagen zu implementieren und evaluieren. Hierdurch entsteht ein Steuerungskonzept, das lokale und globale gegenseitige Abhängigkeiten zwischen Transporten berücksichtigt und somit die Leistungsfähigkeit von aMFS steigert.

### **11.3 Ausblick**

Das in dieser Arbeit vorgestellte Steuerungskonzept sowie die entwickelten Modelle und Berechnungsgrundlagen dienen zunächst als Basis für die Berücksichtigung von Transportabhängigkeiten. Auf diese Basis kann in Zukunft aufgebaut werden, um die Einflüsse von Transportabhängigkeiten genauer vorhersagen und in der Planung berücksichtigen zu können. Weitere Einflüsse von Transportabhängigkeiten auf die Leistungsfähigkeit eines aMFS werden beispielsweise durch mehrere unabhängige bB auf einer ssR, die Anzahl und Eigenschaften der kreuzenden ssR, die Länge einer Route und die Durchsatzschwankungen einer ssR verursacht. Weitergehende Untersuchungen dieser Einflüsse auf die Leistungsfähigkeit eines aMFS ermöglichen die Entwicklung von weiteren Modellen und Berechnungsgrundlagen, die in die Routenplanung integriert werden können.

Für die lokale Materialflusssteuerung besitzt die Pulkförderung beispielsweise noch Potential die Leistungsfähigkeit eines aMFM zu verbessern. In diesem Fall koordiniert die aMFM interne Materialflusssteuerung die parallele Ausführung von mehreren TE im selben Arbeitsraum.

Große Potentiale liegen auch noch in der Planung von ssR. Das in dieser Arbeit vorgestellte Konzept stellt nur einen ersten Ansatz da, um Routen in kurzer Zeit online zu ermitteln. In zukünftigen Arbeiten sollte aber die offline Berechnung mittels Heuristiken oder maschinellem Lernen untersucht werden, die aufgrund ihrer globalen Sichtweise deutlich bessere Ergebnisse versprechen. Die Konzepte bieten die Möglichkeit, in zyklischen Abständen auf einer separaten Rechenhardware aufwendige Routenoptimierungen durchzuführen und an das aMFS zurückzuspielen. aMFS richten dann lediglich neue Routen mit vereinfachten online Verfahren ein, wobei die Anzahl an neuen Routen mit zunehmender Betriebsdauer abnimmt. ssR schaffen insbesondere für maschinelles Lernen die Voraussetzung Trainingsdaten zu generieren [fml-2018d]. Beispielsweise ist es möglich, die aktuell eingerichteten ssR, die auftretenden Materialflussströme und die Leistungsfähigkeit als Trainingsdatensatz zu erfassen. Im Falle von hoch dynamischen Routingverfahren, die für jeden Transport eine neue Route ermitteln, lassen sich die Effekte der kurzzeitig eingerichteten Routen auf die Leistungsfähigkeit nur schwer isolieren. Zumal sich die durch heuristische Verfahren oder maschinelles Lernen ermittelten Routen direkt in das aMFS zurückspielen und einrichten lassen.

Ein weiterer Aspekt für die zukünftige Forschung ist ein globales Kapazitätsmanagement. Nach dem Gesetz von *Little* hängt der Systemdurchsatz von der durchschnittlichen Transportzeit und der Anzahl an TE in einem System ab. In dieser Arbeit durfte die Routenberechnung Umwege planen, um Transportabhängigkeiten zu reduzieren. In einem weiteren Schritt berechnet das aMFS die Auswirkungen des Umwegs auf die durchschnittliche Transportzeit und die Anzahl an TE im aMFS. Auf Basis des Gesetzes von *Little* kann ein aMFS dann bestimmen, ob der Umweg auch die globale Leistungsfähigkeit eines aMFS erhöht. Hierauf aufbauend sind auch weitere online-Optimierungen denkbar.



## Literaturverzeichnis

---

- [Aic-2016] Aicher, T.; Regulin, D.; Schütz, D.; Lieberoth-Leden, C.; Spindler, M.; Günthner, W. A.; Vogel-Heuser, B.: Increasing flexibility of modular automated material flow systems - A meta model architecture. In: 8th IFAC Conference on Manufacturing Modelling Management and Control (MIM), 2016, S. 1543–1548.
- [Aic-2018] Aicher, T.: Automatic backwards compatibility of automated material flow software. Dissertation. Lehrstuhl für Automatisierung und Informationssysteme, Technische Universität München, Garching, 2018.
- [Aic-2022] Aicher, T.; Fottner, J.; Vogel-Heuser, B.: A model-driven engineering design process for the development of control software for Intralogistics Systems. In: at - Automatisierungstechnik, Jg. 70 (2022) Nr. 2
- [Aki-2011] Akillioglu, H.; Onori, M.: Evolvable production systems and impacts on production planning. In: IEEE International Symposium on Assembly and Manufacturing (ISAM), 2011.
- [Ara-2000] Arai, T.; Aiyama, Y.; Maeda, Y.; Sugi, M.; Ota, J.: Agile Assembly System by “Plug and Produce”. In: CIRP Annals - Manufacturing Technology, Jg. 49 (2000) Nr. 1, S. 1–4.
- [Arn-1998] Arnold, D.; Rall, B.: Analyse des Lkw-Ankunftsverhaltens in Terminals des kombinierten Verkehrs. In: Internationales Verkehrswesen, Jg. 50 (1998) Nr. 6, S. 262–264.
- [Arn-2009] Arnold, D.; Furmans, K.: Materialfluss in Logistiksystemen. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2009.
- [Ash-2007] Ash, G. R.: Traffic engineering and QoS optimization of integrated voice & data networks. Morgan Kaufmann, Amsterdam, Boston, 2007.
- [Aßm-2019] Aßmann, R.: Systemtechnik für die Stückgutförderung. In: Schmidt, T. (Hrsg.): Innerbetriebliche Logistik. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2019, S. 1–40.
- [Ban-2008] Bangsow, S.: Fertigungssimulationen mit Plant Simulation und SimTalk – Anwendung und Programmierung mit Beispielen und Lösungen. Hanser, München, 2008.

- [Bau-2013] Bauer, K.; Diegner, B.; Diemer, J.; Dorst, W.; Ferber, S.; Glatz, R.; Hellinger, A.; Herfs, W.; Horstmann, M.; Kaufmann, T.; Kurz, C.; Löwen, U.; Stumpf, V.: Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0 – Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0. acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e. V., 2013.
- [Bau-2014] Bauernhansl, T.; Hompel, M. ten; Vogel-Heuser, B. (Hrsg.): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Springer Fachmedien, Wiesbaden, 2014.
- [Bel-2008] Bellifemine, F.; Caire, G.; Greenwood, D. P. A.: Developing multi-agent systems with JADE. Wiley, Chichester, 2008.
- [Bey-2019] Beyer, T. F.: Agentenbasiertes Engineering und Reengineering von automatisierten Systemen in der Grobplanung. Dissertation, Universität Stuttgart, Düren, 2019.
- [Bla-2010] Black, G.; Vyatkin, V.: Intelligent Component-Based Automation of Baggage Handling Systems With IEC 61499. In: IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, Jg. 7 (2010) Nr. 2, S. 337–351.
- [Ble-2009] Blessing, L. T. M.; Chakrabarti, A.: DRM, a design research methodology. Springer-Verlag, London, 2009.
- [Bru-1998] Brussel, H. van; Wyns, J.; Valckenaers, P.; Bongaerts, L.; Peeters, P.: Reference architecture for holonic manufacturing systems: PROSA. In: Computers in Industry, Jg. 37 (1998) Nr. 3, S. 255–274.
- [Car-1996] Carbonell, J. G.; Siekmann, J.; Goos, G.; Hartmanis, J.; van Leeuwen, J.; Müller, J. P.: The Design of Intelligent Agents. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1996.
- [Cof-1971] Coffman, E. G.; Elphick, M.; Shoshani, A.: System Deadlocks. In: ACM Computing Surveys, Jg. 3 (1971) Nr. 2, S. 67–78.
- [Cru-2019] Cruz Salazar, L. A.; Ryashentseva, D.; Lüder, A.; Vogel-Heuser, B.: Cyber-physical production systems architecture based on multi-agent's design pattern—comparison of selected approaches mapping four agent patterns. In: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Jg. 105 (2019) Nr. 9, S. 4005–4034.
- [Dan-2017] Danny, P.; Ferreira, P.; Lohse, N.; Guedes, M.: An AutomationML model for plug-and-produce assembly systems. In: IEEE 15th International Conference on Industrial Informatics (INDIN), 2017, S. 849–854.

- [Dar-2015] Dardari, D.; Closas, P.; Djuric, P. M.: Indoor Tracking: Theory, Methods, and Technologies. In: IEEE Transactions on Vehicular Technology, Jg. 64 (2015) Nr. 4, S. 1263–1278.
- [Die-2017] Diestel, R.: Graph Theory. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2017.
- [Dij-1959] Dijkstra, E. W.: A note on two problems in connexion with graphs. In: Numerische Mathematik, Jg. 1 (1959) Nr. 1, S. 269–271.
- [Dil-1991] Dilts, D. M.; Boyd, N. P.; Whorms, H. H.: The evolution of control architectures for automated manufacturing systems. In: Journal of Manufacturing Systems, Jg. 10 (1991) Nr. 1, S. 79–93.
- [DIN-19237] Deutsches Institut für Normung: Steuerungstechnik. DIN Nr. 19237, 1980.
- [Drö-2017] Dröder, K.; Dietrich, F.; Tornow, A.; Löchte, C.; Wonnenberg, B.; Gerbers, R.; Bobka, P.: Transfersysteme. In: Reinhart, G. (Hrsg.): Handbuch Industrie 4.0. Hanser, München, 2017, S. 429–450.
- [Epp-2013] Epple, U.: Agentenmodelle in der Anlagenautomation. In: Göhner, P. (Hrsg.): Agentensysteme in der Automatisierungstechnik. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2013, S. 95–110.
- [Fer-1964] Ferschl, F.: Zufallsabhängige Wirtschaftsprozesse. Physica-Verlag, Wien, 1964.
- [Fir-2018] Firvida, M. B.; Thamer, H.; Uriarte, C.; Freitag, M.: Decentralized omnidirectional route planning and reservation for highly flexible material flow systems with small-scaled conveyor modules. In: IEEE 23rd International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), 2018, S. 685–692.
- [Fis-2017] Fischer, J.; Marcos, M.; Aicher, T.; Vogel-Heuser, B.: Agentenbasierte Steuerung von Logistiksystemen. In: atp edition - Automatisierungstechnische Praxis, Jg. 59 (2017) Nr. 09, S. 16–26.
- [Fis-2019] Fischer, J.; Lieberoth-Leden, C.; Fottner, J.; Vogel-Heuser, B.: Erhöhung der Rekonfigurierbarkeit automatisierter Materialflusssysteme durch einen agentenbasierten Steuerungsansatz. In: 28. Deutscher Materialfluss-Kongress, 2019, S. 91–98.
- [Fis-2020] Fischer, J.; Lieberoth-Leden, C.; Fottner, J.; Vogel-Heuser, B.: Design, Application, and Evaluation of a Multiagent System in the Logistics Domain. In: IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, Jg. 17 (2020) Nr. 2, S. 1283–1296.

- [Fle-2003] Fletcher, M.; McFarlane, D.; Lucas, A.; Brusey, J.; Jarvis, D.: The Cambridge Packing Cell — A Holonic Enterprise Demonstrator. In: Mařík, V.; Pěchouček, M.; Müller, J. (Hrsg.): Multi-Agent Systems and Applications III. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2003, S. 533–543.
- [Flo-1962] Floyd, R. W.: Algorithm 97: Shortest path. In: Communications of the ACM, Jg. 5 (1962) Nr. 6, S. 344–348.
- [For-1956] Ford, L. R.: Network flow theory. The RAND Corporation, Technischer Bericht, 1956.
- [For-2000] Fortz, B.; Thorup, M.: Internet Traffic Engineering by Optimizing OSPF Weights. In: IEEE Infocom, 2000, S. 519–528.
- [Fot-2019] Fottner, J.: Förder- und Materialflusstechnik. Vorlesungsskript, Technische Universität München, Garching, 2019.
- [Fou-2004] Foundation for Intelligent Physical Agents: FIPA Agent Management Specification. <http://www.fipa.org/specs/fipa00023/SC00023K.pdf>, Aufruf am 12.06.2018.
- [Fug-2010] Fugate, B.; Mentzer, J.; Stank, T.: Logistics Performance: Efficiency, Effectiveness, and Differentiation. In: Journal of Business Logistics, Jg. 31 (2010), S. 43–62.
- [Gor-2003] Gorodetski, V.; Karsaev, O.; Konushy, V.: Multi-agent System for Resource Allocation and Scheduling. In: Mařík, V.; Pěchouček, M.; Müller, J. (Hrsg.): Multi-Agent Systems and Applications III. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2003, S. 236–246.
- [Gud-2011] Gudehus, T.: Logistik – Grundlagen - Strategien - Anwendungen. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2011.
- [Gün-2010a] Günthner, W. A.; Chisu, R.; Kuzmany, F. A.: Die Vision vom Internet der Dinge. In: Günthner, W. A.; Hompel, M. ten (Hrsg.): Internet der Dinge in der Intralogistik. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2010, S. 43–46.
- [Gün-2010b] Günthner, W. A.; Hompel, M. ten (Hrsg.): Internet der Dinge in der Intralogistik. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2010.
- [Gün-2016] Günthner, W. A.; Klenk, E.; Tenerowicz-Wirth, P.: Adaptive Logistiksysteme als Wegbereiter der Industrie 4.0. In: Vogel-Heuser, B.; Bauernhansl, T.; Hompel, M. ten (Hrsg.): Handbuch Industrie 4.0 Bd.4: Allgemeine Grundlagen. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, 2016, S. 97–123.

- [Hah-2006] Hahn-Woernle, C.; Dullinger, K.-H.; Beumer, C.; Prieschenk, H.; Welsch, V.; Bauer, N.: Fördern, Lagern, Kommissionieren, Sortieren — der harte Kern der Intralogistik. In: Arnold, D. (Hrsg.): Intralogistik. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2006, S. 101–191.
- [Han-2009] Handelsblatt: Trendwende. In: Handelsblatt, Jg. 2009 (2009) Nr. 89, S. A1.
- [Han-2013] Haneyah, S.W.A.: Generic control of material handling systems. Dissertation, University of Twente, Enschede, 2013.
- [Har-1968] Hart, P.; Nilsson, N.; Raphael, B.: A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths. In: IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics, Jg. 4 (1968) Nr. 2, S. 100–107.
- [Hew-1977] Hewitt, C.: Viewing control structures as patterns of passing messages. In: Artificial Intelligence, Jg. 8 (1977) Nr. 3, S. 323–364.
- [Hom-2005] Hompel, M. ten; Liekenbrock, D.; Stuer, P.: Realtime Logistics: Echtzeitnahe Steuerung von Materialflusssystemen auf Basis autonomer Agenten und Entitäten. In: Logistics Journal (2005), S. 1–5.
- [Hom-2007] Hompel, M. ten; Schmidt, T.; Nagel, L.; Jünemann, R.: Materialflusssysteme. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2007.
- [Hom-2010] Hompel, M. ten; Schmidt, T.: Warehouse Management. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2010.
- [Joh-1961] John D. C. Little: A Proof for the Queuing Formula:  $L = \lambda W$ . In: Operations Research, Jg. 9 (1961) Nr. 3, S. 383–387.
- [Joh-1977] Johnson, D. B.: Efficient Algorithms for Shortest Paths in Sparse Networks. In: Journal of the ACM, Jg. 24 (1977) Nr. 1, S. 1–13.
- [Joh-2009] John, K. H.; Tiegelkamp, M.: SPS-Programmierung mit IEC 61131-3. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2009.
- [Jün-1989a] Jünemann, R.; Daum, M.; Piepel, U.; Schwinning, S.: Materialfluss und Logistik – Systemtechnische Grundlagen mit Praxisbeispielen. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1989.
- [Jün-1989b] Jünemann, R.: Materialfluß und Logistik – Systemtechnische Grundlagen mit Praxisbeispielen. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1989.
- [Jün-1998] Jünemann, R.; Beyer, A.: Steuerung von Materialfluß- und Logistiksystemen – Informations- und Steuerungssysteme, Automatisierungstechnik. Springer, Berlin, Heidelberg, 1998.

- [Kim-1991] Kim, C. W.; Tanchoco, J. M. A.: Conflict-free shortest-time bidirectional AGV routing. In: International Journal of Production Research, Jg. 29 (1991) Nr. 12, S. 2377–2391.
- [Kjæ-2010] Kjærgaard, M. B.; Godsk, T.; Toftkjær, T.; Christensen, D. L.; Grønbæk, K.: Indoor Positioning Using GPS Revisited. In: Floréen, P.; Krüger, A.; Spasojevic, M. (Hrsg.): Pervasive computing. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2010, S. 38–56.
- [Krä-2002] Krämer, K.: Automatisierung in Materialfluss und Logistik. Deutscher Universitätsverlag, Wiesbaden, 2002.
- [Kru-2012] Krumke, S. O.; Noltemeier, H.: Graphentheoretische Konzepte und Algorithmen. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2012.
- [Krü-2013] Krühn, T.; Radosavac, M.; Shchekutin, N.; Overmeyer, L.: Decentralized and dynamic routing for a Cognitive Conveyor. In: 2013 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, 2013, S. 436–441.
- [Krü-2015] Krühn, T.: Dezentrale, verteilte Steuerung flächiger Fördersysteme für den innerbetrieblichen Materialfluss. Dissertation. Institut für Transport- und Automatisierungstechnik (ITA), Leibniz Universität Hannover, Garbsen, 2015.
- [Kuh-1989] Kuhn, A.; Schmidt, R.; Jorichs, H.: Planung logistischer Systeme - ganzheitliche Gestaltung. In: Bonny, C. (Hrsg.): Jahrbuch der Logistik. Verlagsgruppe Handelsblatt, Düsseldorf, 1989, S. 125–133.
- [Lao-2018] Laoudias, C.; Moreira, A.; Kim, S.; Lee, S.; Wirola, L.; Fischione, C.: A Survey of Enabling Technologies for Network Localization, Tracking, and Navigation. In: IEEE Communications Surveys & Tutorials, Jg. 20 (2018) Nr. 4, S. 3607–3644.
- [Lau-1999] Lauber, R.; Göhner, P.: Prozessautomatisierung 1 – Automatisierungssysteme und -strukturen, Computer- und Bussysteme für die Anlagen- und Produktautomatisierung, Echtzeitprogrammierung und Echtzeitbetriebssysteme, Zuverlässigkeits- und Sicherheitstechnik. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1999.
- [Law-2015] Law, A. M.: Simulation modeling and analysis. Mcgraw-Hill, New York, 2015.
- [Lei-2009] Leitão, P.: Agent-based distributed manufacturing control: A state-of-the-art survey. In: Engineering Applications of Artificial Intelligence, Jg. 22 (2009) Nr. 7, S. 979–991.

- [Lei-2013] Leitão, P.; Mařík, V.; Vrba, P.: Past, Present, and Future of Industrial Agent Applications. In: IEEE Transactions on Industrial Informatics, Jg. 9 (2013) Nr. 4, S. 2360–2372.
- [Lei-2019] Leitão, P.; Barbosa, J.: Modular and Self-organized Conveyor System Using Multi-agent Systems. In: Demazeau, Y., et al. (Hrsg.): Advances in Practical Applications of Survivable Agents and Multi-Agent Systems: The PAAMS Collection. Springer International Publishing, Cham, 2019, S. 259–263.
- [Lib-2011] Libert, S.: Beitrag zur agentenbasierten Gestaltung von Materialflusssteuerungen. Dissertation. Lehrstuhl für Förder- und Lagerwesen, Technische Universität Dortmund, Dortmund, 2011.
- [Lie-2016] Lieberoth-Leden, C.; Regulin, D.; Günthner, W. A.: Efficient messaging through cluster coordinators in decentralized controlled material flow systems. In: 5th International Conference on Transportation and Traffic Engineering (ICTTE), 2016.
- [Lie-2017] Lieberoth-Leden, C.; Röschinger, M.; Lechner, J.; Günthner, W. A.: Logistik 4.0. In: Reinhart, G. (Hrsg.): Handbuch Industrie 4.0. Hanser, München, 2017, S. 451–512.
- [Lie-2018a] Lieberoth-Leden, C.; Fischer, J.; Fottner, J.; Vogel-Heuser, B.: Control Architecture and Transport Coordination for Autonomous Logistics Modules in Flexible Automated Material Flow Systems. In: 14th IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE), 2018, S. 736-743.
- [Lie-2018b] Lieberoth-Leden, C.; Fottner, J.: Deployment of an Distributed Strategic Material Flow Control for Automated Material Flow Systems Consisting of Autonomous Modules. In: 15th IMHRC Proceedings, 2018.
- [Lie-2019] Lieberoth-Leden, C.; Fischer, J.; Vogel-Heuser, B.; Fottner, J.: Implementation, self-configuration and coordination of logistical functions for autonomous logistics modules in flexible automated material flow systems. In: International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research, Jg. 8 (2019) Nr. 4, S. 498–505.
- [Lie-2021] Lienert, T.: Methodik zur simulationsbasierten Durchsatzanalyse FTF-basierter Kommissioniersysteme. Dissertation. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, Garching, 2021.
- [Lin-2007] Lindberg, B.; Onori, M.; Semere, D.: Evolvable Production Systems: A Position Paper. Swedish Production Symposium, 2007.

- [Loh-2011] Lohse, D.; Schnabel, W. (Hrsg.): Verkehrsplanung. Beuth; Kirschbaum, Berlin, Bonn, 2011.
- [Lüd-2017] Lüder, A.; Schmidt, N.: AutomationML in a Nutshell. In: Vogel-Heuser, B.; Bauernhansl, T.; Hompel, M. ten (Hrsg.): Handbuch Industrie 4.0 Bd.2. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2017, S. 213–258.
- [Mac-2018] Macoir, N.; Ridolfi, M.; Rossey, J.; Moerman, I.; Poorter, E. de: MAC Protocol for Supporting Multiple Roaming Users in Mult-Cell UWB Localization Networks. In: IEEE 19th International Symposium on "A World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks" (WoWMoM), 2018, S. 588–599.
- [Mae-1994] Maes, P. (Hrsg.): Designing autonomous agents – Theory and practice from biology to engineering and back. MIT Press, Cambridge, 1994.
- [Mag-2011a] Maga, C. R.; Jazdi, N.; Göhner, P.: Requirements on engineering tools for increasing reuse in industrial automation. In: IEEE 16th Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA), 2011.
- [Mag-2011b] Maga, C. R.; Jazdi, N.; Göhner, P.: Reusable Models in Industrial Automation: Experiences in Defining Appropriate Levels of Granularity. In: IFAC Proceedings Volumes, Jg. 44 (2011) Nr. 1, S. 9145–9150.
- [Mař-2003] Mařík, V.; Pěchouček, M.; Müller, J. (Hrsg.): Multi-Agent Systems and Applications III. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2003.
- [Mar-2018] Marks, P.; Hoang, X. L.; Weyrich, M.; Fay, A.: A systematic approach for supporting the adaptation process of discrete manufacturing machines. In: Research in Engineering Design, Jg. 29 (2018) Nr. 4, S. 621–641.
- [Mat-1999] Maturana, F.; Shen, W.; Norrie, D. H.: MetaMorph: An adaptive agent-based architecture for intelligent manufacturing. In: International Journal of Production Research, Jg. 37 (1999) Nr. 10, S. 2159–2173.
- [Mat-2014] Materialfluss: Marktübersicht Fördertechnik. In: Materialfluss (2014) Nr. Dez.
- [May-2009] Mayer, S. H.: Development of a completely decentralized control system for modular continuous conveyor systems. Dissertation. Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, 2009.

- [Maz-2001] Maza, S.; Castagna, P.: Conflict-free AGV routing in bi-directional network. In: 8th International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), 2001, S. 761–764.
- [Mer-2005] Mertens, P.; Rässler, S.: Prognoserechnung. Physica-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2005.
- [Mis-2017] Misra, S.; Goswami, S.: Network routing – Fundamentals, applications, and emerging technologies. Wiley, Chichester, West Sussex, United Kingdom, 2017.
- [Mon-2006] Monostori, L.; Váncza, J.; Kumara, S.R.T.: Agent-Based Systems for Manufacturing. In: CIRP Annals - Manufacturing Technology, Jg. 55 (2006) Nr. 2, S. 697–720.
- [Mor-2010] Mors, A. W. ter: The world according to MARP – Multi-Agent Route Planning. Dissertation, Technische Universiteit Delft, Delft, 2010.
- [Nie-2010] Nieke, C.: Materialflusssteuerung heute und ihre Defizite. In: Günthner, W. A.; Hompel, M. ten (Hrsg.): Internet der Dinge in der Intralogistik. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2010, S. 15–21.
- [Nyh-2008] Nyhuis, P.; Heinen, T.; Reinhart, G.; Rimpau, C.; Abele, E.; Wörn, A.: Wandlungsfähige Produktionssysteme. In: wt Werkstatttechnik, Jg. 98 (2008) Nr. 1/2, S. 85–91.
- [Obe-2013] Obermann, K.; Horneffer, M.: Datennetztechnologien für Next Generation Networks – Ethernet, IP, MPLS und andere. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2013.
- [Obj-2017] Object Management Group: OMG Systems Modeling Language – Version 1.5. <https://sysml.org/sysml-specifications/>, Aufruf am 10.09.2019.
- [Ono-2006] Onori, M.; Barata, J.; Frei, R.: Evolvable Assembly Systems Basic Principles. In: Information Technology For Balanced Manufacturing Systems, 2006, S. 317–328.
- [Ono-2009] Onori, M.; Barata, J.: Evolvable Productions Systems: Mechatronic Production Equipment with process-based Distributed Control. In: IFAC Proceedings Volumes, Jg. 42 (2009) Nr. 16, S. 80–85.
- [Oro-2007] Orozco, O. J. L.; Lastra, J. L. M.: A Real-Time Interface for Agent-Based Control. In: International Symposium on Industrial Embedded Systems, 2007, S. 49–54.
- [Osborne-2002] Osborne, E. D.; Simha, A.: Traffic engineering with MPLS. Cisco, Technischer Bericht, 2002.

- [Pri-2015] Priego, R.; Armentia, A.; Estevez, E.; Marcos, M.: On applying MDE for generating reconfigurable automation systems. In: IEEE 13th International Conference on Industrial Informatics (INDIN), 2015, S. 1233–1238.
- [Rab-2008] Rabe, M.; Spiekermann, S.; Wenzel, S.: Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik – Vorgehensmodelle und Techniken. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2008.
- [Reg-2015] Regulin, D.; Glaese, A.; Feldmann, S.; Schutz, D.; Vogel-Heuser, B.: Enabling flexible automation system hardware: Dynamic reconfiguration of a real-time capable field-bus. In: 13th International Conference on Industrial Informatics (INDIN), 2015, S. 1198–1205.
- [Reg-2016] Regulin, D.; Schutz, D.; Aicher, T.; Vogel-Heuser, B.: Model based design of knowledge bases in multi agent systems for enabling automatic reconfiguration capabilities of material flow modules. In: IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE), 2016, S. 133–140.
- [Rei-2010] Reinhart, G.; Krug, S.; Huttner, S.; Mari, Z.; Riedelbauch, F.; Schlogel, M.: Automatic configuration (Plug & Produce) of Industrial Ethernet networks. In: 9th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications (INDUSCON), 2010.
- [Sak-2017] Sakpere, W.; Adeyeye Oshin, M.; Mlitwa, N. B. W.: A State-of-the-Art Survey of Indoor Positioning and Navigation Systems and Technologies. In: South African Computer Journal, Jg. 29 (2017) Nr. 3
- [Sch-2009] Schmidt, T.; Schulze, F.: Future Approaches to Meet Complexity Requirements in Material Handling Systems. In: FME Transactions, Jg. 37 (2009), S. 159–166.
- [Sch-2015] Schüller, A.; Epple, U.: Ein Referenzmodell zur Prozedurbeschreibung. In: at - Automatisierungstechnik, Jg. 63 (2015) Nr. 2
- [Sei-2016] Seibold, Z.: Logical time for decentralized control of material handling systems. Dissertation. Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe, 2016.
- [She-2000] Shen, W.; Maturana, F.; Norrie, D. H.: MetaMorph II: an agent-based architecture for distributed intelligent design and manufacturing. In: Journal of Intelligent Manufacturing, Jg. 11 (2000) Nr. 3, S. 237–251.

- [Sie-2019] Siemens Product Lifecycle Management Software Inc.: Plant Simulation. <https://www.plm.automation.siemens.com/store/de-de/trial/plant-simulation.html>, Aufruf am 04.09.2019.
- [Sil-2014] Silva, B.; Pang, Z.; Akerberg, J.; Neander, J.; Hancke, G.: Experimental study of UWB-based high precision localization for industrial applications. In: IEEE International Conference on Ultra-WideBand (ICUWB), 2014, S. 280–285.
- [Spi-2018] Spindler, M.: Zwei-Schichten-Architektur zur modellbasierten Erstellung der Steuerungssoftware für automatisierte Materialflusssysteme. Dissertation. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, Garching, 2018.
- [Ste-2005] Steierwald, G.: Stadtverkehrsplanung – Grundlagen, Methoden, Ziele. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2005.
- [Szd-2002] Szdzuy, A.: Aspects of granularity for components. Vortrag, 2002.
- [Val-1994] Valckenaers, P.; Bonneville, F.; van Brussel, H.; Bongaerts, L.; Wyns, J.: Results of the holonic control system benchmark at KU Leuven. In: Proceedings of the Fourth International Conference on Computer Integrated Manufacturing and Automation Technology, 1994, S. 128–133.
- [Val-2009] Vallee, M.; Kaindl, H.; Merdan, M.; Lepuschitz, W.; Arnautovic, E.; Vrba, P.: An automation agent architecture with a reflective world model in manufacturing systems. In: IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (SMC), 2009, S. 305–310.
- [VDI-2653] Verein Deutscher Ingenieure; Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik: Agentensysteme in der Automatisierungstechnik. VDI/VDE-Richtlinie Nr. 2653 Blatt 1, 2018.
- [VDI-3633] Verein Deutscher Ingenieure: Simulation von Logistik-, Materialfluss und Produktionssystemen. VDI-Richtlinie Nr. 3633, 2014.
- [VDI-4440] Verein Deutscher Ingenieure: Übersichtsblätter Stetigförderer für Stückgut. VDI-Richtlinie Nr. 4440, 2007.
- [VDI-5100] Verein Deutscher Ingenieure: Systemarchitektur für die Intralogistik. VDI/VDMA-Richtlinie Nr. 5100, 2016.
- [VDM-15276] Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e. V.: Fördertechnik - Datenschnittstellen in Materialflußsteuerungen. VDMA Nr. 15276, 1994.

- [Vog-2009] Vogel-Heuser, B.; Kegel, G.; Bender, K.; Wucherer, K.: Global Information Architecture for Industrial Automation. In: Automatisierungstechnische Praxis (atp), Jg. 51 (2009) Nr. 1, S. 108–115.
- [Vog-2015] Vogel-Heuser, B.; Lee, J.; Leitão, P.: Agents enabling cyber-physical production systems. In: at - Automatisierungstechnik, Jg. 63 (2015) Nr. 10
- [Vog-2019] Vogel-Heuser, B.; Fischer, J.; Seitz, M.; Lieberoth-Leden, C.; Fottner, J.: Increasing the reconfigurability of automated material flow systems using an agent-based control approach. In: 16th International Conference on Automation Technology, 2019.
- [War-1962] Warshall, S.: A Theorem on Boolean Matrices. In: Journal of the ACM, Jg. 9 (1962) Nr. 1
- [Was-2016] Wassilew, S.; Urbas, L.; Ladiges, J.; Fay, A.; Holm, T.: Transformation of the NAMUR MTP to OPC UA to allow plug and produce for modular process automation. In: 2016 IEEE 21st International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), 2016.
- [Wil-2006] Wilke, M.: Wandelbare automatisierte Materialflusssysteme für dynamische Produktionsstrukturen. Dissertation. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss und Logistik, Technische Universität München, Garching, 2006.
- [Woo-1995] Wooldridge, M.; Jennings, N. R.: Intelligent agents: theory and practice. In: The Knowledge Engineering Review, Jg. 10 (1995) Nr. 2, S. 115–152.
- [You-2018] Yousefifar, R.: Entwicklung eines agentenbasierten Konzepts zur flexiblen Systemplanung von Distributionszentren. Dissertation. Institut für Fördertechnik und Logistik, Universität Stuttgart, 2018.

## Durch den Autor betreute studentische Arbeiten

Im Rahmen der durch diese Dissertation aufgegriffenen Forschungsthematik wurden nachfolgende Studienarbeiten erstellt. Die Anfertigung der Arbeiten wurde durch den Autor wissenschaftlich und inhaltlich angeleitet.

| Kurzbeleg   | Titel   | Autor               | Art            | Abgabe |
|-------------|---|---------------------|----------------|--------|
| [fml-2016a] | Dezentrale Gestaltung von wandelbaren Materialflusssteuerungen  | Taralunga, Roxana   | Masterarbeit   | 2016   |
| [fml-2016b] | Konzeption und Umsetzung eines Prototyps für eine agentenbasierte Auftragssteuerung in der Automobilproduktion                              | Brunner, Andreas    | Masterarbeit   | 2016   |
| [fml-2017a] | Interne Auftragsausführungsplanung von dezentral gesteuerten Modulen  | Lauer, Tim          | Semesterarbeit | 2017   |
| [fml-2017b] | Technologievergleich und -Bewertung zur Positionsdatenerfassung für flexible Materialflusssysteme   | Gehlen, Lukas       | Bachelorarbeit | 2017   |
| [fml-2018a] | Auswahl und Implementierung eines Indoor-Ortungssystems für Module von automatisierten Materialflusssystemen                                | Behling, Maximilian | Semesterarbeit | 2018   |
| [fml-2018b] | Schnittstellenkonfiguration bei der flexiblen Kombination von unterschiedlichen Fördermitteln in einem Materialflusssystem                  | Bernard, Manfred    | Masterarbeit   | 2018   |
| [fml-2018c] | Adaptierung und Implementierung von Optimierungsverfahren aus dem Operations Research Bereich für automatisierte Materialflusssysteme       | Mestiri, Slaheddine | Semesterarbeit | 2018   |
| [fml-2018d] | Entwicklung einer selbstlernenden Steuerung für die Ermittlung von Materialflussrouten in hochflexiblen fahrerlosen Transportsystemen (FTS) | Dreher, Bianca      | Masterarbeit   | 2018   |



# Abbildungsverzeichnis

---

## Hauptteil

|                 |  |    |
|-----------------|--|----|
| Abbildung 1-1:  | Schematische Darstellung einer adaptiven Produktion.   | 1  |
| Abbildung 1-2:  | Beispiele für die Ausprägung von MFS (Bilder: © SSI Schäfer und ROFA INDUSTRIAL AUTOMATION AG).  | 2  |
| Abbildung 1-3:  | Schematische Darstellung eines aMFS, zu dem Module hinzugefügt, entfernt oder geändert werden können und das über standardisierte Schnittstellen kommuniziert.                                 | 4  |
| Abbildung 1-4:  | Aufbau der Arbeit mit dem zusammengefassten Ergebnis der Kapitel.  | 7  |
| Abbildung 2-1:  | Beispiele für einen stetigen und aussetzenden Fördervorgang mit schematischem Geschwindigkeitsverlauf.   | 12 |
| Abbildung 2-2:  | Übersicht an verschiedenen stetigen Fördermitteltypen nach [Fot-2019, S. 47] und [VDI-4440] (Bilder: GEBHARDT Fördertechnik GmbH, ROFA INDUSTRIAL AUTOMATION AG und NERAK GmbH Fördertechnik). | 13 |
| Abbildung 2-3:  | Übersicht an verschiedenen unstetigen Fördermitteltypen (Bilder: Jungheinrich AG, GEBHARDT Fördertechnik GmbH, ROFA INDUSTRIAL AUTOMATION AG und ABUS Kransysteme GmbH).                       | 14 |
| Abbildung 2-4:  | Schematisches Ebenen-Modell der Materialflussautomatisierung in der Logistik in Anlehnung an [Fot-2019, S. 154] mit einer Aufgabenschreibung nach [Hom-2010, S. 224ff.].                       | 16 |
| Abbildung 2-5:  | Modellierung eines MFS (links) in einem Graphen (Mitte) und einer Adjazenzmatrix (rechts).   | 20 |
| Abbildung 2-6:  | Schematische Abbildung eines Telekommunikationsnetzwerkes bestehend aus Routern und Verbindungen mit einer Metrik.   | 25 |
| Abbildung 2-7:  | Klassifizierung der dynamischen Routing-Protokolle nach [Mis-2017, S. 52].   | 26 |
| Abbildung 2-8:  | Eingerichteter LSP in einem schematischen Netzwerk.  | 28 |
| Abbildung 2-9:  | Berücksichtigung von weiteren Kriterien beim CSPF, wie z. B. der Bandbreite, führt zu LSP, die vom günstigsten Pfad abweichen können.  | 29 |
| Abbildung 2-10: | Diskreter Transport mit mittlerem Abstand und Geschwindigkeit auf einem stetigen Förderelement vom Typ Bandförderer.   | 31 |
| Abbildung 2-11: | QVW als Transportelement höherer Ordnung mit mehreren Ein- und Ausgängen.  | 31 |

|   |    |
|---|----|
| Abbildung 2-12: Bediensystem mit einer Quelle (Q), einer Senke (S) und einem Drehtisch als Bedienstation (B) in Anlehnung an [Arn-2009, S. 113].                                    | 34 |
| Abbildung 2-13: Reservierung von Modulen für eine TE zu vordefinierten Zeitfenstern.  | 35 |
| Abbildung 3-1: Klassifizierung des Stands der Wissenschaft mit blau für Logistikprojekte und orange für Produktionsprojekte.  | 41 |
| Abbildung 4-1: Zusammenhang zwischen Flexibilität und Effizienz in Abhängigkeit der Granularität der Modellierung nach [Szd-2002].  | 48 |
| Abbildung 5-1: Beispiel eines aMFM, aufgebaut aus Mechanik-Komponenten (Förderbänder, Lichtschranken und Ausschieber), Steuerungshardware und -software.                            | 54 |
| Abbildung 5-2: Bestandteile eines Automatisierungsagenten in einem UML-Klassendiagramm nach [Val-2009, S. 306].   | 55 |
| Abbildung 5-3: Aufbau eines Software Agenten für ein aMFM in Anlehnung an [Fis-2020].   | 56 |
| Abbildung 5-4: Darstellung der Kommunikation in einem aMFS mit und ohne Koordinator-aMFM.   | 59 |
| Abbildung 5-5: Informationen und Struktur eines Transportauftrages in Anlehnung an [Lib-2011, S. 78].   | 61 |
| Abbildung 6-1: Abfolge der aMFM Phasen Entwicklung, Inbetriebnahme und Betrieb.   | 63 |
| Abbildung 6-2: Räumliche und Schematische Darstellung mit internem aMFM-Koordinatensystem einer T-Kreuzung mit zwei Förderbändern und einem Ausschieber.                            | 64 |
| Abbildung 6-3: Modellierung einer H-Kreuzung mit unterschiedlichen Granularitäten.  | 65 |
| Abbildung 6-4: Beispiele von zulässigen und unzulässigen Gestaltungen von Arbeitsräumen.  | 66 |
| Abbildung 6-5: Im Programm hinterlegte Positionen der TE auf der T-Kreuzung.  | 68 |
| Abbildung 6-6: Zusammenhang zwischen Übergabeart und Materialflussschnittstellen.   | 71 |
| Abbildung 6-7: Darstellung der Interaktionsdurchmesser für Materialflussschnittstellen am Beispiel eines Kreuzungs-aMFM links und eines Kreuzungs-aMFM mit Zusatzkomponente rechts. | 74 |
| Abbildung 6-8: Ablauf der Konfiguration eines neuen aMFM.   | 75 |
| Abbildung 6-9: Referenzposition (grüner Punkt) eines aMFM mit dem maximalen Toleranzbereich (orangener gestrichelter Kreis) der Lokalisierung der Referenzposition.                 | 77 |

|  |     |
|--|-----|
| Abbildung 6-10: Plausibilisierung der gemessenen Position mit der eingetragenen Referenzposition und Verwerfung einer Referenzposition für die weitere Bearbeitung der Daten.  | 78  |
| Abbildung 6-11: Vorgehen bei der Konfiguration der Übergaben und Generierung der Übergabefunktionen zwischen zwei benachbarten aMFM.   | 79  |
| Abbildung 6-12: Vorgehen bei der aMFM internen Konfiguration der Übergabefunktionen.   | 80  |
| Abbildung 6-13: T-Kreuzung mit benachbarten aMFM.  | 82  |
| Abbildung 6-14: Sequenzdiagramm des Kommunikationsablaufs zur Konfiguration eines neuen aMFM.  | 85  |
| Abbildung 6-15: Beispiel für einen Ausführungsplan der T-Kreuzung.   | 86  |
| Abbildung 6-16: Beispiele für die Optimierung des Ausführungsplans der T-Kreuzung.   | 87  |
| Abbildung 6-17: Beispiele für die TE-Reihenfolge auf einem H-Kreuzung-aMFM mit Einfluss auf die Kapazität.   | 88  |
| Abbildung 6-18: Einplanung der neuen LO von TE3 links ohne und rechts mit Einplanungsstrategie für das Beispiel der H-Kreuzung aus Abbildung 6-17.   | 89  |
| Abbildung 6-19: Beispiele für die Anwendung von Einplanungsstrategien mit Verletzung der aufgestellten Grundsätze.   | 90  |
| Abbildung 7-1: Schematische Darstellung der Gestaltungsmöglichkeiten eines Routingverfahrens für Transportnetzwerke.   | 95  |
| Abbildung 7-2: In Telekommunikationsnetzwerken hat die Richtung der Transporte keinen Einfluss auf die Transportzeit oder den Durchsatz während bei Transportnetzwerken eine Abhängigkeit besteht.   | 96  |
| Abbildung 7-3: Schematische Abbildung eines QVW mit Zu- und Abführstrecken als eigenständige aMFM.   | 99  |
| Abbildung 7-4: Darstellung der verschiedenen Möglichkeiten, um das QVW-System in Abbildung 7-3 in einer Adjazenzmatrix zu modellieren. Das „x“ markiert eine vorhandene Verbindung mit Eigenschaften. Das „M“ steht als Platzhalter für benachbarte aMFM an den Zu- und Abführstrecken, die nicht abgebildet sind. | 99  |
| Abbildung 7-5: Darstellung von drei beispielhaften Transportsituationen für einen Drehtisch und den jeweiligen Zeitkomponenten, die auf den aMFM anfallen.   | 101 |
| Abbildung 7-6: Beispiel für die Ermittlung der Taktzeit für aMFM mit unterschiedlicher Anzahl an Arbeitsräumen.  | 103 |
| Abbildung 7-7: Schematische Darstellung von zwei unterschiedlichen Verteilungen der Materialflussströme auf die Verbindungen für ein aMFM vom Typ QVW mit Zu- und Abführstrecken aMFM.   | 104 |

|   |     |
|---|-----|
| Abbildung 7-8: Abbildung der Zustände des QVW aMFM aus Abbildung 7-7 vor einem Transport in einem Übergangdiagramm mit den Übergangswahrscheinlichkeiten.   | 105 |
| Abbildung 7-9: Bereich eines aMFS mit gegenläufigen ssR und der schematischen Darstellung der Zeit $t_{bB,T}$ für den Transport durch den bB, der Kapazität $\lambda$ für eine Richtung und der Taktzeit $t_{bB,Ta}$ .  | 109 |
| Abbildung 7-10: Modellierung des bB aus Abbildung 7-9 als Bediensystem.   | 111 |
| Abbildung 7-11: Verteilungsfunktionen der Bedienzeit für verschiedene Zustände des bB aus Sicht der blau markierten TE mit Transportrichtung 1.   | 112 |
| Abbildung 7-12: Verschachtelte bB mit den Transportzeiten $t_{bB1,T}$ und $t_{bB2,T}$ durch die bB sowie den kumulierten ssR Kapazitäten $\lambda_{bB1}$ und $\lambda_{bB2}$ .  | 116 |
| Abbildung 7-13: Bestehender bB 1 mit dem minimalen bB 2, der sich für das markierte aMFM in jedem Fall bei der Einplanung von neuen ssR ergibt.   | 117 |
| Abbildung 7-14: Für einen beispielhaften bB ( $t_{bB,Ta,1} = t_{bB,Ta,2} = 9$ s, $t_{bB,T,1} = t_{bB,T,2} = 28$ s, $\lambda_2 = 100$ TE / Stunde) ist für verschiedene Werte $\lambda_1$ links der Verlauf der Auslastung nach Formel (7-24) des bB und rechts die durchschnittliche Blockgröße nach Formel (7-23) logarithmisch aufgetragen. | 118 |
| Abbildung 7-15: Ankunftsmodell für einen bB mit Bildung der Blockgrößen.  | 119 |
| Abbildung 7-16: Beispielhafter Verlauf von ssR in einem bB.   | 120 |
| Abbildung 7-17: Betrachtung des Bereichs aus Abbildung 7-16 aus Sicht der globalen Topologie.   | 121 |
| Abbildung 7-18: Beispielhafter Verlauf von ssR in einem bB.   | 124 |
| Abbildung 8-1: Vorgehensweisen zur Bestimmung von Materialflussrelationen und Bewertung der Güte.   | 127 |
| Abbildung 8-2: Darstellung des Vorgehens bei der Routenberechnung.  | 130 |
| Abbildung 8-3: bB als Engpass für den Durchsatz eines aMFS.   | 134 |
| Abbildung 8-4: Sperren von Verbindungen bei hohen geforderten Durchsätzen.  | 137 |
| Abbildung 8-5: Vergleich des Lösungsraums eines zeitfensterbasierten Routings und Reservierung.   | 140 |
| Abbildung 8-6: Diskretisierung der Reservierungen in Intervalle.  | 141 |
| Abbildung 8-7: Ermittlung und Weitergabe der minimalen Kapazität eines Intervalls auf der Route.  | 142 |
| Abbildung 8-8: Sperrung von Intervallen bei einem bB mit gegenläufigen Reservierungen.  | 142 |

|  |     |
|--|-----|
| Abbildung 8-9: Durch das Warten auf einem Vorgänger-aMFM können gesperrte Intervalle aufgehoben und im weiteren Verlauf wieder berücksichtigt werden.                    | 143 |
| Abbildung 8-10: Ermittlung des verfügbaren Zeitfensters auf einem aMFM.  | 144 |
| Abbildung 8-11: Ermittlung des gewünschten und frühesten Eintrittszeitpunkts.  | 145 |
| Abbildung 8-12: Anordnung der vorhandenen Zeitfenster verhindert eine weitere Reservierung.  | 145 |
| Abbildung 8-13: Einplanen einer weiteren Reservierung durch verspäten einer Reservierung.  | 146 |
| Abbildung 8-14: Durch einen aMFM Ausfall verursachte Blockierung.  | 148 |
| Abbildung 8-15: Gegenseitige Blockierung der Einplanungsversuche.  | 149 |
| Abbildung 9-1: Modellierung eines aMFM vom Typ „Bandförderer“ in einem aMFM Baustein mit Programmcode für LO und Übergabeoperationen.                                    | 153 |
| Abbildung 9-2: Beispiel für ein aMFS Layout bestehend aus aMFM Bausteinen.   | 154 |
| Abbildung 9-3: Beispiel für die automatisch generierte Modellierung der Fördertechnik eines aMFS auf Basis des aMFS Layouts und aMFM Bausteine.                          | 155 |
| Abbildung 9-4: Aus der LO-Liste des H-Kreuzung-aMFM links wird automatisch das Transportangebot des aMFM rechts generiert.   | 157 |
| Abbildung 9-5: Verlauf von eingerichteten ssR (farbige Linien) in einem aMFS für verschiedene Materialflussrelationen.   | 158 |
| Abbildung 9-6: Beispiel für die schrittweise Abarbeitung eines Ausführungsplans.   | 159 |
| Abbildung 10-1: Gestaltung eines aMFM in verschiedenen Granularitätsstufen.  | 162 |
| Abbildung 10-2: Erreichter Durchsatz für verschiedene Granularitätsstufen eines aMFM.  | 163 |
| Abbildung 10-3: Erreichter Durchsatz für einen QVW in Abhängigkeit einer Einplanungsstrategie und der erlaubten Verspätung.  | 164 |
| Abbildung 10-4: Verteilung der Materialflussströme innerhalb des aMFM vom Typ QVW.   | 166 |
| Abbildung 10-5: Vergleich des berechneten maximalen Durchsatzes mit dem erreichten maximalen Durchsatz einer betrachteten Verbindung für verschiedene aMFM-Auslastungen. | 166 |
| Abbildung 10-6: Im Simulationsmodell abgebildeter bidirektionaler Bereich.   | 167 |
| Abbildung 10-7: Mit gemessenen Werten nach Gleichung (7-24) berechnete aMFM Auslastung beim Erreichen der maximalen Kapazität.   | 168 |
| Abbildung 10-8: Maximal erreichter Durchsatz in Relation zum Durchsatzverhältnis.  | 168 |

|   |     |
|---|-----|
| Abbildung 10-9: Ergebnis der Berechnung der maximalen Kapazität eines bB zu verschiedenen Auslastungen der betrachteten Verbindung im Verhältnis zum erreichbaren Durchsatz.                    | 169 |
| Abbildung 10-10: Gemessene Abstände (> 70% Auslastung) für verschiedene Verhältnisse $\lambda_1$ zu $\lambda_2$ .   | 170 |
| Abbildung 10-11: Relative und absolute Abweichung der berechneten zur erreichten maximalen Kapazität für verschiedene Verhältnisse $\lambda_1$ zu $\lambda_2$ .                                 | 171 |
| Abbildung 10-12: Relative und absolute Abweichung der berechneten zur erreichten maximalen Kapazität für verschiedene Durchsatzverhältnisse.  | 171 |
| Abbildung 10-13: Mehrfach verschachtelter bB.   | 172 |
| Abbildung 10-14: Verlauf des erreichten aMFS Durchsatzes vom Soll für unterschiedlich lange äußere Bereiche in Abhängigkeit des Durchsatzanteils Außen.   | 173 |
| Abbildung 10-15: Verlauf des erreichten aMFS Durchsatzes vom Soll für unterschiedlich lange äußere Bereiche in Abhängigkeit des Durchsatzanteil Außen und Querverkehrs.                         | 174 |
| Abbildung 10-16: Berechnete Auslastung des inneren und äußeren bB.  | 174 |
| Abbildung 10-17: Ungünstige Konstellationen an Materialflusstströmen für die Routenberechnung mit einer Verschachtelungsmatrix.   | 175 |
| Abbildung 10-18: Vergleich der von der Routenberechnung berechneten und realen aMFS Auslastung für eine ungünstige Konstellation an Materialflusstströmen.                                      | 176 |
| Abbildung 10-19: aMFS im Stile eines Manhattan Layouts.   | 177 |
| Abbildung 10-20: Maximal berechnete Auslastung aus der Routenberechnung in Relation der Abweichung des erreichten Durchsatzes vom geforderten aMFS Durchsatz mit linearer Trendlinie in orange. | 177 |
| Abbildung 10-21: Zwei beispielhafte aMFS und die Verteilung der ssR auf die Alternativstrecken.   | 178 |
| Abbildung 10-22: Vergleich des erreichten Durchsatzes zum geforderten Durchsatz für verschiedene Routenauswahlverfahren und aMFS Durchsätze.  | 180 |
| Abbildung 10-23: Erreichter Durchsatz für verschiedene erlaubte Längen des Umwegs.  | 180 |
| Abbildung 10-24: Anwendung einer Optimierung an einem Beispiellayout.   | 181 |
| Abbildung 10-25: Optimierung in einem Manhattan Layout.   | 182 |
| Abbildung 10-26: Erreichter Durchsatz und durchschnittliche Anzahl an Reservierungsversuchen pro Transportauftrag für verschiedene Reservierungsverfahren.                                      | 183 |

---

|   |     |
|---|-----|
| Abbildung 10-27: Einfluss der Intervalllänge und des Betrachtungszeitraums auf den Durchsatz.   | 184 |
| Abbildung 10-28: Einfluss der Intervalllänge und des Betrachtungszeitraums auf die Anzahl der durchschnittlichen Reservierungsversuche pro Transport. | 185 |
| Abbildung 10-29: Vergleich der durchschnittlichen mit der minimalen Kapazität für die Berechnung der Intervallkapazitäten.                            | 185 |
| Abbildung 10-30: Vergleich verschiedener Auswahlstrategien für ein Startintervall mit dem Durchsatz und den Reservierungsversuchen.                   | 186 |

## **Anhang A**

|  |     |
|--|-----|
| Abbildung B-1: Struktur des in dieser Arbeit entwickelten Steuerungskonzepts in der Simulationsumgebung Plant Simulation.    | B-1 |
| Abbildung B-2: Modellierung der LO und Übergabeoperationen eines aMFM in der Simulationsumgebung Plant Simulation.           | B-2 |
| Abbildung B-3: Modellierung der LO-Liste und des Transportangebots eines aMFM in der Simulationsumgebung Plant Simulation.   | B-3 |
| Abbildung B-4: Beispiel für die schrittweise Abarbeitung eines Ausführungsplans in der Simulationsumgebung Plant Simulation. | B-4 |



# Tabellenverzeichnis

---

## Hauptteil

|              |  |     |
|--------------|--|-----|
| Tabelle 4-1: | Anforderungen an die Systemarchitektur.  | 47  |
| Tabelle 4-2: | Anforderungen an die Selbstkonfiguration der Module.   | 50  |
| Tabelle 4-3: | Anforderungen an das Routing und die Transportkoordination in einem aMFS.  | 52  |
| Tabelle 6-1: | LO-Liste für das Beispiel T-Kreuzung.  | 67  |
| Tabelle 6-2: | Auszug aus der Zuordnung der Übergabearten Fördern (F), Schieben / Ziehen (S), Gleiten (G), Legen / Nehmen (L), Fallen (Fa) und keine Übergabe möglich (X) zu den verschiedenen Fördermittelkombinationen. | 70  |
| Tabelle 6-3: | Identifikation der Materialflussschnittstellen auf Basis der Übergabearten eines Fördermittels.  | 72  |
| Tabelle 6-4: | Kombination der Materialflussschnittstellen in einer Matrix und Zuordnung der Übergabeart.   | 73  |
| Tabelle 6-5: | Vergleich von verschiedenen Lokalisierungstechnologien für den Einsatz innerhalb geschlossener Gebäude nach [fml-2017b].   | 76  |
| Tabelle 6-6: | Fortführung und Erweiterung der LO-Liste aus Tabelle 6-1 mit den Übergabeoperationen.  | 82  |
| Tabelle 6-7: | Aufstellung des theoretischen Transportangebots mit ausführbaren LO-Ketten.  | 83  |
| Tabelle 6-8: | aMFM interne Adjazenzmatrix der LO und Übergabeoperationen mit Ausführungszeiten.  | 84  |
| Tabelle 6-9: | Adjazenzmatrix der lokalen Topologie für das Beispiel T-Kreuzung.  | 84  |
| Tabelle 7-1: | Qualitative Auswertung der Abhängigkeit der durchschnittlichen Blockgröße für Richtung 1 und 2 von der Ausprägung verschiedener Kriterien.   | 115 |
| Tabelle 7-2: | Zusammensetzung der resultierenden Materialflusstrome aus Abbildung 7-17.  | 121 |
| Tabelle 7-3: | Verschachtelungsmatrix zur Darstellung der gegenläufigen ssR für einen verschachtelten bB aus Abbildung 7-17.  | 122 |
| Tabelle 7-4: | Verschachtelungsmatrix zur Darstellung der gleichläufigen Materialflusstrome für einen verschachtelten bB aus Abbildung 7-17.  | 123 |
| Tabelle 7-5: | Beispiel für das Ermitteln der Länge und des Durchsatzes für einen bB.   | 123 |

Tabelle 8-1: Vergleich und Bewertung für verschiedene Möglichkeiten an welcher Stelle die initiale Routenberechnung durchgeführt wird. 128

Tabelle 8-2: Auswahl eines Verfahrens zum Vergleich zwei Routenalternativen auf Basis der Routenberechnungsart. 138

## **Anhang A**

Tabelle A-1: Zuordnung der Übergabearten Fördern (F), Schieben / Ziehen (S), Gleiten (G), Legen / Nehmen (L), Fallen (Fa) und keine Übergabe möglich (X) zu den verschiedenen Fördermittelkombinationen. A-1

Tabelle A-2: Identifikation der Materialfluss-Schnittstellen auf Basis der Übergabearten eines Fördermittels aus Tabelle A-1. A-2

# Anhang A Materialfluss-Schnittstellen

Tabelle A-1: Zuordnung der Übergabearten Fördern (F), Schieben / Ziehen (S), Gleiten (G), Legen / Nehmen (L), Fallen (Fa) und keine Übergabe möglich (X) zu den verschiedenen Fördermittelkombinationen.

| Fördermittel                 | ... annehmendes Modul           |              |                         |               |                     |                     |               |                |                   |                              |                |             |               |                           |                        |              |                   |             |             |              |      |                |
|------------------------------|---------------------------------|--------------|-------------------------|---------------|---------------------|---------------------|---------------|----------------|-------------------|------------------------------|----------------|-------------|---------------|---------------------------|------------------------|--------------|-------------------|-------------|-------------|--------------|------|----------------|
|                              | Übergeordnetes Abgabemittel (U) | Bandförderer | Getriebe- / Förderrolle | Hängeförderer | Kippschalenförderer | Querschalenförderer | Kreuzförderer | Rollerförderer | Remontierförderer | Remontierförderer / Schieber | Aschenförderer | Rutsche     | Kugelförderer | Eimerförderer / Hängeband | Elektronische Förderer | Power & Free | Verzweigungswagen | FTS         | Auflage     | Haltschleife | Kein | Mittelförderer |
| Bandförderer                 | F, S, L, Fa                     | F            | F, S, Fa                | F, S, Fa      | S, Fa               | F                   | F             | F              | F                 | F                            | F, S, Fa       | F           | F, S, Fa      | F, S, Fa                  | F, S, Fa               | F            | F                 | F, S, Fa    | F           | F            | L    | L              |
| Getriebe- / Förderrolle      | F, S, L, Fa                     | F, S, Fa     | F, S, Fa                | F, S, Fa      | S, Fa               | F                   | F             | F              | F                 | F                            | F, S, Fa       | F           | F, S, Fa      | F, S, Fa                  | F, S, Fa               | F            | F                 | F, S, Fa    | F           | F            | L    | L              |
| Hängeförderer                | F, S, L, Fa                     | F, S, Fa     | F, S, Fa                | F, S, Fa      | S, Fa               | F                   | F             | F              | F                 | F                            | F, S, Fa       | F           | F, S, Fa      | F, S, Fa                  | F, S, Fa               | F            | F                 | F, S, Fa    | F           | F            | L    | L              |
| Kippschalenförderer          | F, S, L, Fa                     | F, S, Fa     | F, S, Fa                | F, S, Fa      | S, Fa               | F                   | F             | F              | F                 | F                            | F, S, Fa       | F           | F, S, Fa      | F, S, Fa                  | F, S, Fa               | F            | F                 | F, S, Fa    | F           | F            | L    | L              |
| Querschalenförderer          | F, S, L, Fa                     | F, S, Fa     | F, S, Fa                | F, S, Fa      | S, Fa               | F                   | F             | F              | F                 | F                            | F, S, Fa       | F           | F, S, Fa      | F, S, Fa                  | F, S, Fa               | F            | F                 | F, S, Fa    | F           | F            | L    | L              |
| Kreuzförderer                | F, S, L, Fa                     | F, S, Fa     | F, S, Fa                | F, S, Fa      | S, Fa               | F                   | F             | F              | F                 | F                            | F, S, Fa       | F           | F, S, Fa      | F, S, Fa                  | F, S, Fa               | F            | F                 | F, S, Fa    | F           | F            | L    | L              |
| Remontierförderer            | F, S, L, Fa                     | F, S, Fa     | F, S, Fa                | F, S, Fa      | S, Fa               | F                   | F             | F              | F                 | F                            | F, S, Fa       | F           | F, S, Fa      | F, S, Fa                  | F, S, Fa               | F            | F                 | F, S, Fa    | F           | F            | L    | L              |
| Remontierförderer / Schieber | F, S, L, Fa                     | F, S, Fa     | F, S, Fa                | F, S, Fa      | S, Fa               | F                   | F             | F              | F                 | F                            | F, S, Fa       | F           | F, S, Fa      | F, S, Fa                  | F, S, Fa               | F            | F                 | F, S, Fa    | F           | F            | L    | L              |
| Aschenförderer               | F, S, L, Fa                     | F, S, Fa     | F, S, Fa                | F, S, Fa      | S, Fa               | F                   | F             | F              | F                 | F                            | F, S, Fa       | F           | F, S, Fa      | F, S, Fa                  | F, S, Fa               | F            | F                 | F, S, Fa    | F           | F            | L    | L              |
| Rutsche                      | G, Fa                           | G, Fa        | G, Fa                   | G, Fa         | G, Fa               | G, Fa               | G, Fa         | G, Fa          | G, Fa             | G, Fa                        | G, Fa          | G, Fa       | G, Fa         | G, Fa                     | G, Fa                  | G, Fa        | G, Fa             | G, Fa       | G, Fa       | G, Fa        | X    | X              |
| Kugelförderer                | F, S, L, Fa                     | F, S, Fa     | F, S, Fa                | F, S, Fa      | S, Fa               | F                   | F             | F              | F                 | F                            | F, S, Fa       | F           | F, S, Fa      | F, S, Fa                  | F, S, Fa               | F            | F                 | F, S, Fa    | F           | F            | L    | L              |
| Eimerförderer / Hängeband    | F, S, L, Fa                     | F, S, Fa     | F, S, Fa                | F, S, Fa      | S, Fa               | F                   | F             | F              | F                 | F                            | F, S, Fa       | F           | F, S, Fa      | F, S, Fa                  | F, S, Fa               | F            | F                 | F, S, Fa    | F           | F            | L    | L              |
| Elektronische Förderer       | F, S, L, Fa                     | F, S, Fa     | F, S, Fa                | F, S, Fa      | S, Fa               | F                   | F             | F              | F                 | F                            | F, S, Fa       | F           | F, S, Fa      | F, S, Fa                  | F, S, Fa               | F            | F                 | F, S, Fa    | F           | F            | L    | L              |
| Power & Free                 | F, S, L, Fa                     | F, S, Fa     | F, S, Fa                | F, S, Fa      | S, Fa               | F                   | F             | F              | F                 | F                            | F, S, Fa       | F           | F, S, Fa      | F, S, Fa                  | F, S, Fa               | F            | F                 | F, S, Fa    | F           | F            | L    | L              |
| Verzweigungswagen            | F, S, L, Fa                     | F, S, Fa     | F, S, Fa                | F, S, Fa      | S, Fa               | F                   | F             | F              | F                 | F                            | F, S, Fa       | F           | F, S, Fa      | F, S, Fa                  | F, S, Fa               | F            | F                 | F, S, Fa    | F           | F            | L    | L              |
| FTS                          | F, S, L, Fa                     | F, S, Fa     | F, S, Fa                | F, S, Fa      | S, Fa               | F                   | F             | F              | F                 | F                            | F, S, Fa       | F           | F, S, Fa      | F, S, Fa                  | F, S, Fa               | F            | F                 | F, S, Fa    | F           | F            | L    | L              |
| Auflage                      | F, S, G                         | F, S, G      | F, S, G                 | F, S, G       | S, G                | F, S, G             | F, S, G       | F, S, G        | F, S, G           | F, S, G                      | F, S, G        | F, S, G     | F, S, G       | F, S, G                   | F, S, G                | F, S, G      | F, S, G           | F, S, G     | F, S, G     | F, S, G      | X    | X              |
| Haltschleife                 | F, S, G, Fa                     | F, S, G, Fa  | F, S, G, Fa             | F, S, G, Fa   | S, G, Fa            | F, S, G, Fa         | F, S, G, Fa   | F, S, G, Fa    | F, S, G, Fa       | F, S, G, Fa                  | F, S, G, Fa    | F, S, G, Fa | F, S, G, Fa   | F, S, G, Fa               | F, S, G, Fa            | F, S, G, Fa  | F, S, G, Fa       | F, S, G, Fa | F, S, G, Fa | F, S, G, Fa  | X    | X              |
| Kein                         | L, Fa                           | L, Fa        | L, Fa                   | L, Fa         | L, Fa               | L, Fa               | L, Fa         | L, Fa          | L, Fa             | L, Fa                        | L, Fa          | L, Fa       | L, Fa         | L, Fa                     | L, Fa                  | L, Fa        | L, Fa             | L, Fa       | L, Fa       | L, Fa        | X    | X              |
| Haufenförderer               | L, Fa                           | L, Fa        | L, Fa                   | L, Fa         | L, Fa               | L, Fa               | L, Fa         | L, Fa          | L, Fa             | L, Fa                        | L, Fa          | L, Fa       | L, Fa         | L, Fa                     | L, Fa                  | L, Fa        | L, Fa             | L, Fa       | L, Fa       | L, Fa        | X    | X              |

Tabelle A-2: Identifikation der Materialfluss-Schnittstellen auf Basis der Übergabearten eines Fördermittels aus Tabelle A-1.

| Fördermittel     |                    | Übergabeart<br>(Annahme oder Abgabe einer TE) | Materialflussschnittstelle |         |          |                |                 |       |        |        |
|------------------|--------------------|---|----------------------------|---------|----------|----------------|-----------------|-------|--------|--------|
|                  |                    |   | Fördern                    | Gleiten | Schieben | Fläche<br>Oben | Fläche<br>Seite | Legen | Nehmen | Fallen |
| Stetigförderer   | Bandförderer       | F,S,L,Fa                                      | x                          | x       | x        | x              | x               |       |        | x      |
|                  | Gepäckförderanlage | F,S,L,Fa                                      | x                          | x       | x        | x              | x               |       |        | x      |
|                  | Hängeförderer      | F,S,G,L,Fa                                    | x                          | x       | x        |                |                 | x     | x      |        |
|                  | Kippschalensorter  | G,Fa  |                            | x       |          | x              |                 |       |        | x      |
|                  | Quergurtsorter     | F,S,Fa  | x                          |         | x        |                |                 |       |        |        |
|                  | Kettenförderer     | F,S,L   | x                          |         | x        | x              |                 |       |        |        |
|                  | Rollenförderer     | F,S,Fa,L                                      | x                          | x       | x        | x              | x               |       |        |        |
|                  | Riemenförderer     | F,D,Fa,L                                      | x                          |         | x        | x              |                 |       |        |        |
|                  | Riemenüberschieber | F,S,L,Fa                                      | x                          | x       | x        | x              |                 |       |        |        |
|                  | Ausschieber        | F,S,L,Fa                                      | x                          | x       | x        | x              |                 |       |        |        |
|                  | Rutsche            | G,Fa  |                            | x       |          |                |                 |       |        | x      |
|                  | Kugelbahn          | F,S,L,Fa                                      | x                          | x       | x        | x              | x               |       |        | x      |
| Unstetigförderer | Einschienenbahn    | F,S,G,L,Fa                                    | x                          | x       | x        | x              | x               |       |        | x      |
|                  | Elektrohängebahn   | F,S,G,L,Fa                                    | x                          | x       | x        |                |                 | x     | x      |        |
|                  | Elektroschiebebahn | F,S,G,L,Fa                                    | x                          | x       | x        | x              | x               |       |        | x      |
|                  | Power & Free       | F,S,G,L,Fa                                    | x                          | x       | x        |                |                 | x     | x      |        |
|                  | Verschiebewagen    | F,S,L,Fa                                      | x                          | x       | x        | x              |                 |       |        |        |
|                  | FTS                | F,S,G,Fa                                      | x                          | x       | x        | x              |                 |       |        | x      |
|                  | Aufzüge            | F,S,G   | x                          | x       | x        |                |                 |       |        |        |
|                  | Hubtische          | F,S,G,Fa                                      | x                          | x       | x        | x              |                 |       |        | x      |
|                  | Kran               | L,Fa  |                            |         |          |                |                 | x     | x      |        |
|                  | Industrieroboter   | L,Fa  |                            |         |          |                |                 | x     | x      |        |

# Anhang B Implementierung

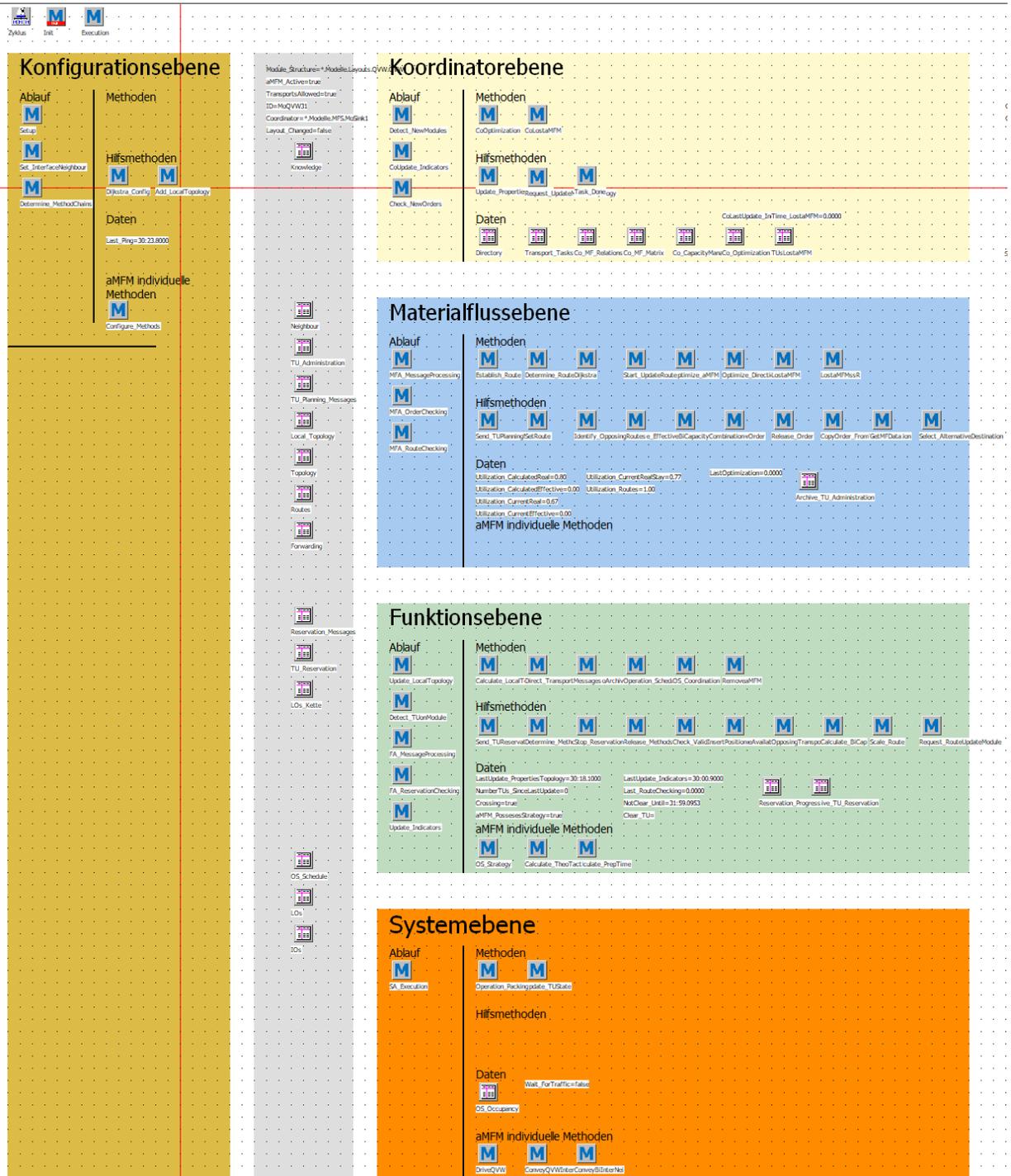
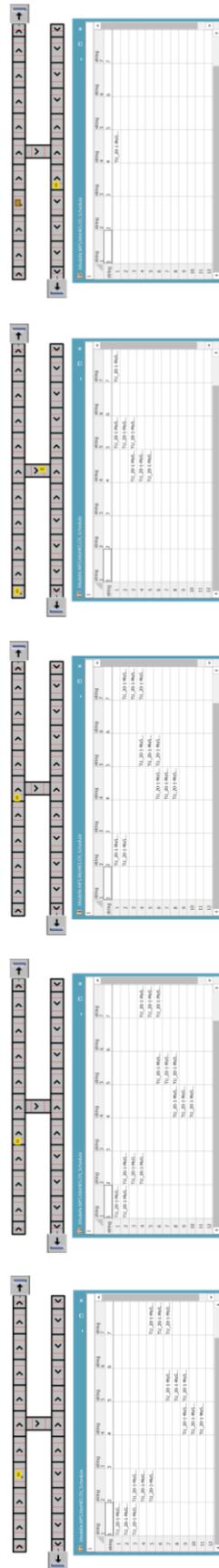


Abbildung B-1: Struktur des in dieser Arbeit entwickelten Steuerungskonzepts in der Simulationsumgebung Plant Simulation.







Ausführungsschritte



Abbildung B-4: Beispiel für die schrittweise Abarbeitung eines Ausführungsplans in der Simulationsumgebung Plant Simulation.