

# Schlussbericht vom 31.03.2022

---

zu IGF-Vorhaben Nr. 21141 N

## Thema

Automatisierte Erstellung optimierter Förderanlagenlayouts für modulare Förderersysteme

## Berichtszeitraum

01.04.2020 - 31.03.2022

## Forschungsvereinigung

Bundesvereinigung Logistik (BVL) e.V.

## Forschungseinrichtung(en)

Institut für Integriert Produktion Hannover gGmbH

Gefördert durch:

## Inhalt

Thema.....	1
Berichtszeitraum.....	1
Forschungsvereinigung .....	1
Forschungseinrichtung(en).....	1
1. Zusammenfassung.....	3
2. Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung .....	4
3. Gegenüberstellung angestrebter Teilziele und erzielter Ergebnisse .....	5
4. Erzielte Ergebnisse .....	7
4.1 Analyse von Anforderungen an die Planungsmethode .....	7
4.2 Konzeptionierung des Planungstools .....	9
4.3 Implementierung des Planungstools.....	22
4.4 Evaluierung der Planungstools.....	23
4.5 Ergebnisdokumentation und Veröffentlichung .....	26
5. Verwendung der Zuwendung .....	26
6. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit .....	27
7. Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen .....	27
8. Veröffentlichungen und Transfermaßnahmen.....	28
9. Einschätzung der Realisierbarkeit der geplanten Maßnahmen.....	30
10. Durchführende Forschungsstelle .....	30
11. Förderhinweis .....	31
Literaturverzeichnis .....	32

## 1. Zusammenfassung

Der Übergang zur Industrie 4.0 stellt die Produktion und Logistik von Unternehmen vor neue Herausforderungen: Produktionszyklen und Produktnutzungsdauern werden stetig kürzer [Hos18]; zunehmende Kundenindividualität führt zu höherer Produktvielfalt, während Losgrößen sinken. Des Weiteren unterliegen kleine und mittelständische Unternehmen (KMU) dem erhöhten Effizienz- und Kostendruck von globalisierte Märkten [Sch18]. Um in Zukunft konkurrenzfähig bleiben zu können, bedarf es auf der Ebene der Intralogistik innovativer Konzepte, die ein deutlich höheres Maß an Flexibilität und Wandlungsfähigkeit ermöglichen [IWL16]. Modulare und kleinskalige modulare Fördersystem ermöglichen mittels definierten Hard- und Softwareschnittstellen eine einfache (Re-)Konfigurierbarkeit von Funktionsbausteinen bzw. Fördermodulen. Durch eine dezentrale Steuerung können zudem teilweise gleichzeitig mehrere intralogistische Funktionen realisiert werden. Somit können modulare Fördersysteme zur Flexibilisierung der Intralogistik eingesetzt werden. Aufgrund ihrer Neuheit sind modulare Fördersysteme bisher nur wenig verbreitet, wodurch sie seitens KMU auch mit Vorbehalten sowie Risiken verbunden sind.

Vor diesem Hintergrund sollten im Rahmen des Forschungsprojekts Evaluierungs- und Optimierungsmethoden für modulare Förderanlagenlayouts entwickelt werden, um KMU den Zugang zu modularer Fördertechnik zu erleichtern und Vergleichbarkeit zu konventionellen Fördersystemen zu ermöglichen. Die zu entwickelnden Methoden können dem Operations Research zugeordnet werden, wobei die zugrundeliegende Problemstellung mit dem Quadratischen Zuordnungsproblem sowie dem Facility Layout Problem verwandt ist (vgl. [Hos18]). In der Literatur existieren zahlreiche Optimierungsmethoden für ähnliche Problemstellungen sowie verschiedene Evaluierungsmethoden für relevanten Zielgrößen, wie beispielsweise Verfahren zur Berechnung des Durchsatzes von Fördersystemen (vgl. Kapitel 4.2.2). Jedoch existierten bisher keine Lösungsansätze, die spezifisch für die zugrundeliegende Problemstellung entwickelt wurden und diese umfassend abbilden. Zudem waren existierende Methoden nicht ohne zusätzliche Anpassungs- und Einarbeitungsaufwände für KMU nutzbar.

Daher sollten im Forschungsprojekt problemspezifische Evaluierungs- und Optimierungsmethoden entwickelt und in ein anwendungsnahes und intuitives Planungstool eingebettet werden. Zunächst wurden gemeinsam mit dem Projektbegleitenden Ausschuss Anforderungen an die Methoden und das Planungstool zusammengetragen und in einem Lastenheft dokumentiert. Anschließend wurde das zugrundeliegende Optimierungsproblem genauer analysiert und klassifiziert. Danach wurde ein Beschreibungsformat entwickelt, mit welchem modulare und konventionelle Förderanlagen umfassend, unter anderem in Form von Objekten, deren Attributen sowie Kennzahlen, dokumentiert werden können. Daraufhin wurden Evaluierungsmethoden für die Zielgrößen Durchsatz, Durchlaufzeit, Flächenbedarf, Pufferkapazität und Investitionskosten entwickelt. Mittels dieser Evaluierungsmethoden ist es möglich modulare Förderanlagen schnell und nachvollziehbar zu bewerten. Gleichzeitig erfolgte die Konzeptionierung der Optimierungsmethode. Hierzu wurden zunächst mögliche Lösungsansätze recherchiert und mit dem Genetischen Algorithmus eine weitverbreitete Metaheuristik ausgewählt und adaptiert. Zusätzlich wurden problemspezifische Subheuristiken entwickelt. Danach wurde das Planungstool entwickelt, indem die Evaluierungs- und Optimierungsmethoden programmiert wurden. Zudem wurde eine intuitive Bedienoberfläche entworfen und umgesetzt, um die geforderte einfache Anwendbarkeit zu gewährleisten. Abschließend wurde das Planungstool und somit auch die Evaluierungs- und Optimierungsmethoden validiert. Die Validierung ergab, dass mit dem Planungstool ohne Vorwissen qualitativ hochwertige Planungsergebnisse bzw. Förderanlagenlayouts entwickelt werden können.

Das Ziel des Vorhabens wurde erreicht.

## 2. Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung

Der Übergang zur Industrie 4.0 stellt die Produktion und Logistik von Unternehmen vor neue Herausforderungen. Produktionszyklen werden stetig kürzer, damit einhergehend nehmen Nutzungs- und Produktlebensdauer in vielen Fällen ab [Hos18]. Gleichzeitig führt die zunehmende Individualisierung der Produkte zu einer höheren Produktvielfalt, während Losgrößen sinken. Dabei unterliegen insbesondere kleine und mittlere Unternehmen (KMU) im globalisierten Markt bzw. Wettbewerb einem wachsenden Effizienz- und Kostendruck [Sch18]. Um in Zukunft konkurrenzfähig bleiben zu können, bedarf es auf der Ebene der Intralogistik innovativer Konzepte, die ein deutlich höheres Maß an Flexibilität und Wandlungsfähigkeit ermöglichen (vgl. [IWL16]). In den vergangenen Jahren wurden aus diesem Grund von mehreren Herstellern (vgl. [cel20], [fle20], [Ove17], [Ven16], [Int22]) modulare Fördersysteme entwickelt. Diese bestehen aus Funktionsbausteinen, welche Güter durch verschiedene technische Konfigurationen multidirektional (vor-, rück- sowie seitwärts) transportieren können. Im Gegensatz dazu können konventionelle Förderer (bspw. Band- oder Rollenförderer) Güter in der Regel nur bidirektional (vor- und rückwärts) transportieren. Die Funktionsbausteine werden über definierte Hard- und Softwareschnittstellen verbunden. Dadurch können sie flexibel hinsichtlich Ausrichtung, Anordnung, und Anzahl zu einer komplexen Förderanlage zusammengeschlossen werden. Durch eine dezentrale Steuerung werden mehrere unterschiedliche intralogistische Funktionen, wie Sequenzieren, Fördern, Ein- und Ausschleusen oder Puffern abgebildet [Ven12].

Kleinskalige modulare Förderersysteme stellen eine Weiterentwicklung des modularen Förderkonzeptes da. Die Dimension eines Funktionsbausteins ist bei diesen Fördersystemen deutlich geringer als die Abmessungen des Fördergutes. Wie in Bild 1 dargestellt werden mehrere Funktionsbausteine zu einer Zelle zusammengefasst. Diese stellt die kleinste Einheit dar, welche zur Handhabung des Gutes erforderlich ist. In einem einzelnen Verbund mehrerer Zellen lassen sich dadurch mehrere der zuvor genannten intralogistischen Funktionen gleichzeitig realisieren, ohne dass dafür spezialisierte Anlagen notwendig werden. Darüber hinaus können Güter in jedwede Richtung (omnidirektional) transportiert sowie ausgerichtet werden. Kleinskalige modulare Fördersysteme waren Bestandteil mehrerer Forschungs- und Entwicklungsprojekte (bspw. netkoPs – Vernetzte, kognitive Produktionssysteme [Ove17] oder celluveyor – Hochflexible Fördertechnik für die Intralogistik 4.0 [Uri15]) sowie Dissertationen (bspw. [May09], [Krü15], [Ven16], [Shc19], [Soh21]) und wurden in den vergangenen Jahren zur Marktreife gebracht [cel20].

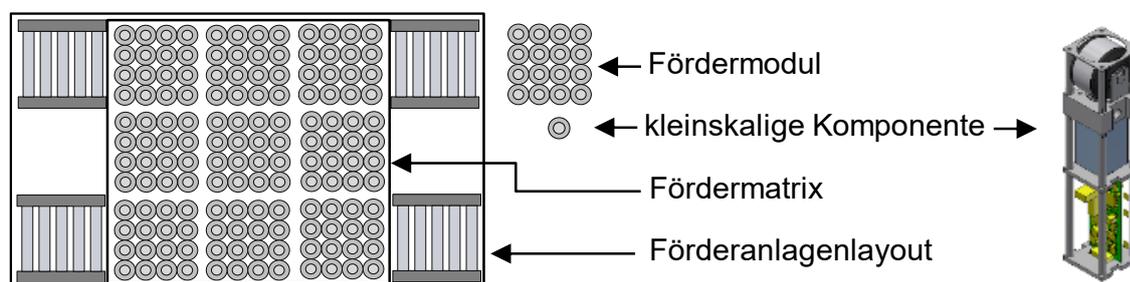


Bild 1: Aufbau eines modularen Fördersystems (vgl. [Ove17])

Modulare Fördersysteme bieten je nach Anwendungsfall direkte sowie indirekte Vorteile. Insbesondere kleinskalige modulare Fördersysteme können in einem Verbund gleichzeitig mehrere Aufgaben erfüllen. Dadurch kann Raum effizienter genutzt werden. Anpassungen des Layouts infolge einer veränderten Produktion können durch den hohen Grad an Wandlungsfähigkeit

schneller umgesetzt werden. Werden Änderungen an dem Layout in wiederkehrenden Abständen notwendig, ist es dadurch möglich, Folgekosten für ein Unternehmen zu reduzieren. Dies gilt ebenfalls, wenn es zu Änderungen im Materialfluss kommt, welche in der Planung gänzlich unberücksichtigt blieben. Aufgrund des höheren Maßes an Flexibilität können auch unvorhergesehene Zustände, wie beispielsweise eine Größenänderung des Fördergutes besser kompensiert werden. Besonders in KMU wird ein geringes Maß an Flexibilität in der Intralogistik gegenwärtig noch vielfach durch einen erhöhten Grad an manuellen Tätigkeiten ausgeglichen [Bis15]. Ein niedrigerer Automatisierungsgrad kann in vielen Fällen neben erhöhtem Personalaufwand Auswirkungen auf Durchsatz und Betriebssicherheit haben. Würden intralogistische Prozesse durch den Einsatz modularer Förderer ganz oder teilweise automatisiert werden, könnten Wirtschaftlichkeit und Fehleranfälligkeit verbessert werden.

Für einen breiten Einsatz modularer Fördertechnik ist gegenwärtig keine ausreichende Akzeptanz bei Anwendern gegeben. Ursächlich dafür sind verschiedene Hemmnisse. Zum einen ist die Beschreibung der intralogistischen Funktionen und die Quantifizierung von Kennzahlen für modulare Fördersysteme aufgrund eines deutlich größeren Parameterraumes besonders komplex. Hierdurch entstehen erhöhte Planungs- bzw. Beratungskosten, welche die potenziellen Einsparungen und Effizienzsteigerungen im Besonderen bei KMU schnell neutralisieren. Des Weiteren wird die Vergleichbarkeit von modularen und konventionellen Fördersystemen durch die unterschiedlichen Funktionsweisen erschwert. Ausreichend dimensioniert realisiert eine Matrix kleinskaliger Fördermodule mehrere intralogistische Funktionen simultan. Konventionelle Fördertechnik benötigt für die Bereitstellung gleicher Funktionen mehrere separate Anlagen. Chancen und Verbesserungen durch den Einsatz modularer Fördertechnik lassen sich dadurch nur bedingt gegenüber konventionellen Lösungen darstellen. Darüber hinaus existieren gegenwärtig auf dem Markt keine Softwarelösungen, welche modulare Fördersysteme hinreichend berücksichtigen. Dementsprechend ist auch kein virtueller Vergleich konventioneller und modularer Fördersysteme möglich. Ein weiteres Hemmnis für modulare Fördertechnik sind die oberhalb jener von konventionellen, nicht-modularen Systemen liegenden Investitionskosten. Kostenvorteile aufgrund einer gesteigerten Wandlungsfähigkeit und Flexibilität entstehen jedoch erst dann, wenn es zu signifikanten Veränderungen im Materialfluss kommt. Eine Abschätzung dieser mittel- bis langfristigen Potentiale modularer Fördersysteme ist schwierig und für jedes Unternehmen individuell.

Um insbesondere KMU den Zugang zu modularer Fördertechnik zu verbessern, sollte eine Vergleichbarkeit zwischen konventioneller und modularer Fördertechnik hergestellt werden. Hierzu sollte ein anwendergerechtes Werkzeug (Anforderungen: niedrigschwelliger Zugang, Erweiterbarkeit, Individualisierbarkeit und Robustheit) zur Verfügung gestellt werden, welches die Unternehmen bei einer individuellen Optimierung ihres Anlagenlayouts unterstützen. Durch die Bereitstellung dieses Werkzeuges werden Planungsdienstleister oder Anwender befähigt, modulare Fördersysteme bewertbar und deren Potentiale nutzbar zu machen.

### **3. Gegenüberstellung angestrebter Teilziele und erzielter Ergebnisse**

Das hier beschriebene Forschungsvorhabens fußte auf zwei Arbeitshypothesen. Die erste Arbeitshypothese besteht darin, dass durch den Einsatz modularer Fördertechnik, Wandlungsfähigkeit und Flexibilität in vielen mittelständischen Unternehmen signifikant gesteigert werden kann. Damit einhergehend soll eine Verbesserung der Wettbewerbsfähigkeit erzielt werden. Die zweite Hypothese ist, dass für jedes Unternehmen ein individuelles Optimum aus quantitativen Zielgrößen, wie Investitionskosten, Durchsatz und Pufferkapazität und qualitativen Zielgrößen,

wie Flexibilität und Wandlungsfähigkeit, ermittelt werden kann.

Zur Untersuchung dieser Hypothesen und zur Hebung der implizierten Potentiale bedurfte es der im Antrag des Forschungsvorhabens angestrebten Methode zur automatisierten Erstellung optimierter Förderanlagenlayouts für modulare Förderersysteme. Dabei sollten erstmals auch kleinskalige, modulare Förderer einbezogen werden. Das Forschungsziel bestand darin ein Planungstool bereitzustellen, um Akzeptanz und der Zugang zur modulareren Fördertechnik für KMU anwenderseitig verbessern.

### **Teilziel 1:**

Angestrebtes Teilziel aus dem Forschungsantrag: Das erste Teilziel war die Entwicklung eines allgemeingültigen Beschreibungsformats, anhand dessen Anlagendaten, Betriebsdaten und Layoutinformationen von Anlagenlayouts sowohl für konventionelle als auch modulare Fördertechnik systematisch erfasst werden können. Durch einen objektorientierten Aufbau und einen intuitiv nachvollziehbaren sowie menschenlesbaren Quelltext sollte das Beschreibungsformat logisch strukturiert und erweiterbar sein. Eine Konnektivität bzw. Komptabilität zu anderen Beschreibungsformaten war explizit nicht Teil des Forschungsvorhabens.

Korrespondierende Ergebnisse des Vorhabens: Das Teilziel wurde durch die Bearbeitung der Arbeitspakete 1 und 2 des Projektantrags erfüllt (vgl. Kapitel 4.1 und 4.2). Zunächst wurden durch Literaturrecherchen und Interviews mit Fördersystemherstellern aus dem projektbegleitenden Ausschuss planungsrelevante Anlagendaten (bspw. Fördergeschwindigkeit), wesentliche logistische Funktionen (bspw. transportieren, puffern), restriktive Randbedingungen (bspw. maximale Dimension des Layouts) und quantitative messbare Zielgrößen aufgenommen und dokumentiert. Anschließend wurde ein allgemeingültiges Datenmodell in der Unified Modeling Language (UML) erstellt, welches die zuvor genannten Informationen logisch verknüpft. Das Datenmodell wurde folgend in die Dateiformate AML und JSON überführt, wodurch die Entwicklung des Beschreibungsformats abgeschlossen wurde.

### **Teilziel 2:**

Angestrebtes Teilziel aus dem Forschungsantrag: Zweites Teilziel war die Entwicklung einer Methode zur Bestimmung bzw. Evaluierung von relevanten Zielgrößen (Durchsatz, Durchlaufzeit, Flächenbedarf, Pufferkapazität und Investitionskosten).

Korrespondierende Ergebnisse des Vorhabens: Das Teilziel wurde durch die Bearbeitung der Arbeitspakete 2 bis 4 des Projektantrags erfüllt (vgl. Kapitel 4.1 und 4.2). Zunächst wurden die im Antrag des Forschungsvorhabens aufgeführten Zielgrößen mit Fördersystemherstellern aus dem projektbegleitenden Ausschuss hinsichtlich ihrer Relevanz bewertet. Alle genannten Zielgrößen wurden als relevant eingeschätzt. Nach Einschätzung der Unternehmen werden bei einer Anlagenplanung im Besonderen der Durchsatz und die Investitionskosten fokussiert. Anschließend wurden für die Berechnung der Zielgrößen formal mathematische Terme aufgestellt. Da Durchsatz und Durchlaufzeit einer hohen Dynamik unterliegen, wurden deren Evaluierungsmethoden durch eine Simulation validiert. Die weiteren Zielgrößen können statisch durch eine Summation berechnet werden. Daraufhin wurden die Evaluierungsmethoden im Planungstools implementiert, um diese bei der Optimierung automatisiert berechnen zu können. Abschließend erfolgte eine zusätzliche Validierung durch Förderanlagenhersteller.

### **Teilziel 3:**

Angestrebtes Teilziel aus dem Forschungsantrag: Das dritte Teilziel bestand in der Entwicklung und Implementierung von geeigneten Verfahren und Methoden zur Optimierung von Anlagenlayouts hinsichtlich unternehmensindividuell gewichteter Zielgrößen. Hier durch sollten Anforderungen des Lastenhefts aus Arbeitspaket 1 in eine praktisch anwendbare Form überführt werden.

Korrespondierende Ergebnisse des Vorhabens: Auf der Grundlage der Ergebnisse von Arbeitspaket 1 wurde das dritte Teilziel durch die Bearbeitung der Arbeitspakete 1 bis 4 des Projektantrags erfüllt (vgl. Kapitel 4.3 und 4.4). Zunächst wurde auf Basis der Informationen des Lastenhefts das zugrundeliegende Optimierungsproblem als statisches Facility Layout Problem klassifiziert und die Entscheidungsvariablen identifiziert (Position, Rotation und Art von Fördermodulen). Anschließend wurden bei einer Literaturrecherche der sogenannte Genetische Algorithmus (eine Metaheuristik) als geeignetes Lösungsverfahren ausgewählt. Da diese Methode per Definition problemunspezifisch ist, wurden entsprechenden Sub-Heuristiken konzeptioniert. Daraufhin wurden die Optimierungsmethode in der Programmiersprache python implementiert und in das Planungstool integriert.

## **4. Erzielte Ergebnisse**

### **4.1 Analyse von Anforderungen an die Planungsmethode**

Das erste Arbeitspaket diente der Spezifizierung von Anforderungen und damit der Definition des Betrachtungsbereichs des Forschungsprojekts. Das Arbeitspaket wurde der Aufteilung im Antrag folgend in zwei Teilarbeitspakete aufgeteilt, die Erstellung eines Lastenhefts und die darauf basierende Klassifizierung des Optimierungsproblems.

#### **Erstellung eines Lastenhefts**

In einem ersten Schritt wurden kommerzielle verfügbare modulare Fördersysteme recherchiert und analysiert (vgl. [cel20], [fle20]). Hierbei wurden zusammen mit den Anlagenherstellern planungsrelevante Anlagendaten, wie zum Beispiel Fördergeschwindigkeiten, maximale Traglasten, Dimensionen oder mögliche Transportgüter erfasst. Darüber hinaus wurde der Umfang der logistischen Funktion (bspw. Transportieren, Puffern, Ausrichten oder Zusammenfassung von Aufträgen) der einzelnen Fördermodule aufgenommen. Im nächsten Schritt wurden mögliche Anwendungsszenarien gebildet, um darauf basierend die planungsrelevanten Eingangsdaten und Rahmenbedingungen ableiten zu können. Zudem wurden mögliche Zielstellungen hinsichtlich ihrer Verwendbarkeit bei einer Layoutoptimierung analysiert. Des Weiteren wurden Anforderungen hinsichtlich der Funktionalitäten und der Bedienoberfläche des zu entwickelnden Planungstools aufgenommen. Die erhobenen Informationen wurden abschließend in einem tabellarischen Lastenheft dokumentiert (vgl. Tabelle 1).

Tabelle 1: Lastenheft mit Anforderungen an die Optimierungsmethode und das Planungstool

Anforderung	Ausprägung / Beschreibung
<b>Optimierungsmethode</b>	
Planungsfall	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Neuplanung (maßgeblicher Planungsfall)</li> <li>- Reorganisationsplanung (Integration in bestehende Förderanlagen)</li> </ul>
Förderertypen	<ul style="list-style-type: none"> <li>- konventionelle Förderer: <ul style="list-style-type: none"> <li>o Bandförderer (unternehmensspezifisch)</li> <li>o Rollenförderer (unternehmensspezifisch)</li> </ul> </li> <li>- modulare Förderer: <ul style="list-style-type: none"> <li>o Flexförderer bzw. Gridsorter (flexlog GmbH)</li> <li>o Celluveyor (cellumation GmbH)</li> <li>o RM 8731 Transfer (Interroll (Switzerland) AG)</li> </ul> </li> </ul>
technische Daten	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fördergeschwindigkeit (je nach logistischer Funktion)</li> <li>- Tragfähigkeit</li> <li>- Transportgüter: <ul style="list-style-type: none"> <li>o Kartonage</li> <li>o Kleinladungsträger</li> </ul> </li> </ul>
logistische Funktionen	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Transportieren</li> <li>- Kreuzungsverhalten</li> </ul>
Eingangsdaten	<ul style="list-style-type: none"> <li>- verfügbare Grundfläche</li> <li>- Anzahl und Position von Quellen und Senken</li> <li>- Anzahl und Position von Sperrflächen</li> <li>- Materialflüsse: <ul style="list-style-type: none"> <li>o Transportgüter (Arten, Menge und Varianz)</li> <li>o Transportintensität (Zugangsraten und -verteilung)</li> <li>o zugehörige Quelle und Senke</li> </ul> </li> </ul>
Betrachtungsgrenzen	<ul style="list-style-type: none"> <li>- maximale Grundfläche einer Fördermatrix: 10 m<sup>2</sup></li> <li>- maximale Anzahl von Quellen bzw. Senken: 10 (orientiert an der Anzahl der deutschen Postleitzahlenregionen)</li> <li>- maximale Anzahl unterschiedlicher Materialflüsse: 100</li> </ul>
Zielfunktion	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Minimierung der Durchlaufzeit</li> <li>- Maximierung des Durchsatzes pro Stunde</li> <li>- Minimierung der notwendigen Pufferplatzanzahl</li> <li>- Minimierung der Investitionskosten</li> <li>- Minimierung des Flächenbedarfs</li> </ul>
<b>Planungstool</b>	
Userinterface	<ul style="list-style-type: none"> <li>- vorgegebener Ablauf der Dateneingabe</li> <li>- aktive Eingabeaufforderung zur Vermeidung des Übergehens planungsrelevanter Daten</li> <li>- Eingabe optionaler Daten kann übersprungen werden</li> <li>- Möglichkeit zur vordefinierten Fixierung von Arbeitsplätzen und Sperrflächen</li> </ul>
Datenausgabe	<ul style="list-style-type: none"> <li>- graphische Darstellung: <ul style="list-style-type: none"> <li>o mit Maßen und Koordinaten der Fördermodule</li> <li>o parallele Darstellung mehrerer Varianten zum direkten Vergleich</li> </ul> </li> <li>- tabellarische Darstellung relevanter Kennwerte bzw. Zielkriterien</li> </ul>

## Klassifizierung des Problems

Im ersten Schritt des zweiten Teilarbeitspakets wurde eine Literaturrecherche zu möglichen Optimierungsproblemen durchgeführt, wobei zusammenfassende Übersichtsartikel bezüglich der Klassifikationen des Facility Layout Problems (FLP) analysiert wurden (vgl. [Hos18], [Sin06], [Dri07]). Die Klassifikation eines Optimierungsproblems erfolgt auf Basis von dessen Eingangsgrößen, Restriktionen und Zielstellungen. Anschließend wurden die Parameter des im ersten Teilarbeitspakets entwickelten Lastenhefts mit dem Klassifikationsschema abgeglichen, um eine zulässige Klassifikation des zugrundeliegenden Optimierungsproblems ableiten zu können. Die Charakteristika des Optimierungsproblems sind in Tabelle 2 aufgeführt.

Tabelle 2: Klassifizierung des Optimierungsproblems

Charakteristikum	Ausprägung / Beschreibung
Planungshorizont	- statisches Layoutproblem (Facility Layout Problem)
Eigenschaften von Fördermodulen	- reguläre quadratische Form - unteilbare und unveränderliche Geometrie - in diskreten Schritten drehbare Ausrichtung (0°, 90°, 180°, 270°) - definierte Quellen- und Senkenposition - Fördermodule dürfen nicht überlappen
Layoutkonfiguration	- Open Field Layout (Freifeld)
Problemrepräsentation	- diskret (durch Elementarzellen)
Datentyp	- deterministische Daten
Zielfunktion	- multikriterielle Zielfunktion

## 4.2 Konzeptionierung des Planungstools

Im zweiten Arbeitspaket wurden die Bestandteile des Planungstools konzeptioniert. Das Arbeitspaket wurde der Aufteilung im Antrag folgend in drei Teilarbeitspakete aufgeteilt, die Entwicklung eines übergreifenden Beschreibungsformats, die Entwicklung von Methoden zur Evaluierung der Zielgrößen und die Entwicklung einer Methode zur Optimierung modularer Anlagenlayouts.

### Entwicklung eines übergreifenden Beschreibungsformats

Im ersten Schritt des Teilarbeitspakets wurde basierend auf den Informationen des Lastenhefts aus Arbeitspaket 1 ein allgemeines Datenmodell aufgestellt (Bild 2). Dies erfolgte in Anlehnung an die Unified Modeling Language (UML). Dabei wurden entsprechende Klassen mit Attributen und Funktionen gebildet, welche dann anhand ihrer Beziehungen zueinander organisiert beziehungsweise verknüpft wurden. Anschließend wurden bestehende Datenformate recherchiert, welche die im Antrag definierten Anforderungen (menschenslesbar, logisch strukturiert, erweiterbar, objektorientiert) erfüllten. Zunächst wurde das Dateiformat AML ausgewählt, da dieses auch die nicht explizit geforderte Kompatibilität zu anderen Beschreibungsformaten erfüllte. Genauer ist AML ein Beschreibungsformat, welches zur Beschreibung von technischen Anlagen entwickelt wurde. Mit Hilfe des sogenannten AML-Editors, einer Software zur Erstellung von AML-Dateien, wurde das Datenmodell umgesetzt. Im Rahmen der Implementierung des Planungstools traten jedoch Konvertierungsprobleme auf. AML basiert entgegen der Dokumentation nicht direkt auf

XML, einem universell les- und schreibbaren Dateiformat, sondern auf einem XSLT-Stylesheet, welches wiederum nur mit einem passenden XLST-Programm bearbeitet werden kann. AML liefert eine Programmierschnittstelle zu diesem XLST-Programm, jedoch ist diese nur für die Programmiersprache C# verfügbar. Da die Konzeptionierung und zum Teil auch Programmierung des Planungstools für die Programmiersprache python erfolgt war, konnte AML nicht wie geplant verwendet werden. Alternative wurde das Dateiformat JSON gewählt, welches ebenfalls alle Anforderungen aus dem Antrag des Forschungsvorhabens erfüllt.

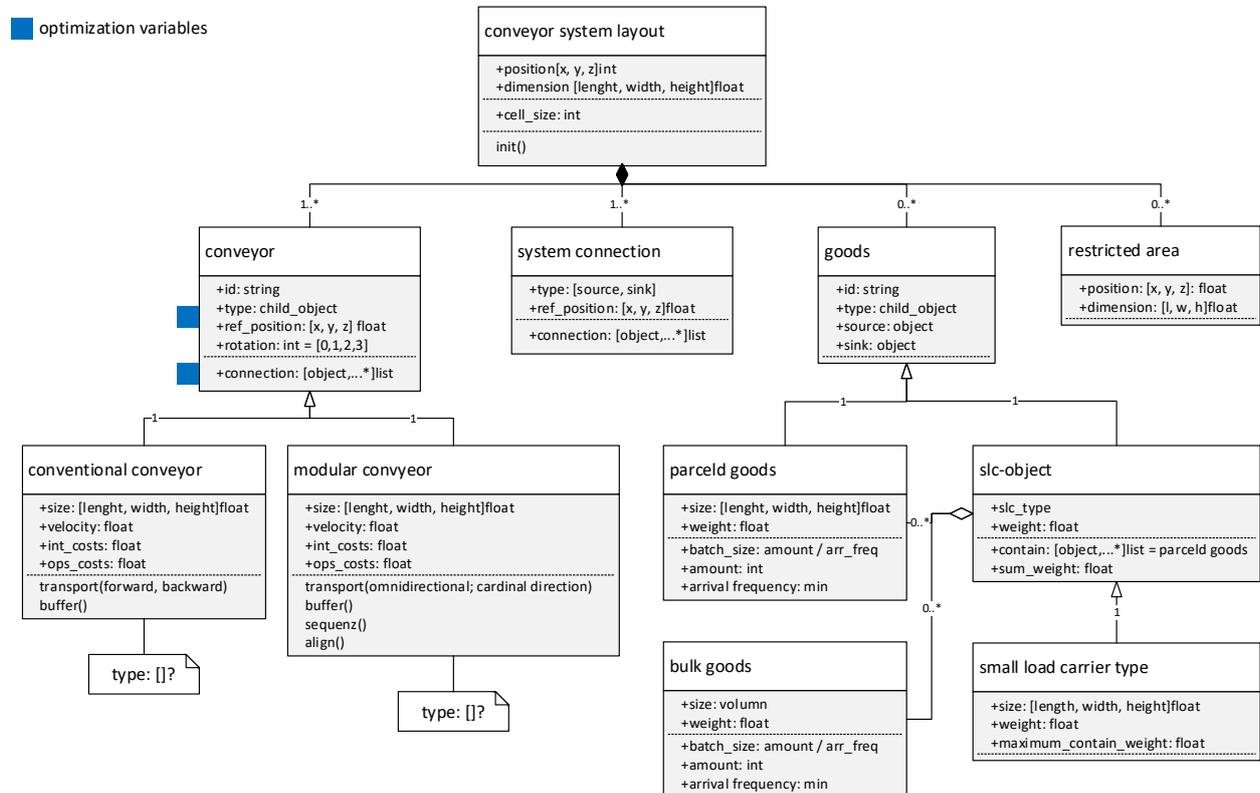


Bild 2: Auszug aus dem Datenmodell

## Entwicklung einer Methode zur Evaluierung von Zielgrößen

Im Rahmen des Teilarbeitspakets wurden zwei unterschiedliche Vorgehensweisen zur Entwicklung der Evaluierungsmethode gewählt. Zum einen wurden die Zielstellungen jeweils durch formale mathematische Terme beschrieben. Auf Grund der hohen Dynamik der Förderanlagen, welche beispielsweise aus der Vielfalt von möglichen Kreuzungs- oder Beschleunigungszuständen resultiert, war es notwendig die zugrundeliegende Komplexität zu reduzieren. Hierzu wurden die komplexen Zustände in wenige verallgemeinerte, aber dadurch beschreibbare, Zustände zusammenfasst. Nur so war es möglich eine analytische Beschreibung von Durchlaufzeit und Durchsatz zu erhalten (vgl. nachfolgender Abschnitt). Daneben wurde in zwei Simulationsstudien geprüft, ob es mit der verfügbaren Materialflusssimulationssoftware effizient möglich ist, kleinskalige modulare Förderanlagen nachzubilden. Zum aktuellen Zeitpunkt existieren noch keine Standardbausteine für die Fördermodule und deren logistischen Funktionen. Daher war es bei der Modellierung ebenfalls notwendig komplexitätsreduzierende Annahmen zu treffen. Die Untersuchungen ergaben, dass es mit den aktuellen Simulationsbibliotheken möglich ist, kleinskalige modulare Förderanlagen abzubilden. Jedoch ist der Aufwand für die manuelle Modellierung eines einzelnen Layouts sehr hoch. Im gegebenen zeitlichen Rahmen war die Entwicklung einer automatisierten

Modellierung nicht umsetzbar. Da bei einer Optimierung sehr viele unterschiedliche Layoutvarianten erzeugt und evaluiert werden müssen, wurde für den weiteren Projektverlauf die formal mathematische Evaluierungsmethode ausgewählt. Die Simulation wurde jedoch verwendet, um die Evaluierungsmethoden von Durchsatz und Durchlaufzeit zu validieren.

Das zugrundeliegende Optimierungsproblem wurde als erweitertes Quadratisches Zuordnungsproblem formuliert. Dementsprechend wird die Grundfläche, in der die Fördermodule angeordnet werden sollen, mit einem Gitter aus gleichförmigen Quadraten überzogen. Es entsteht ein diskretes Koordinatensystem aus Zellen. Die Fördermodule weisen ebenfalls eine quadratische Form auf. Die Zellen der Grundfläche und die Fördermodule müssen gleichgroß sein. Dementsprechend können nur Fördermodule mit den gleichen Maßen innerhalb eines Layouts kombiniert werden. Die Quellen und Senken des Fördersystem liegen angrenzend zur Grundfläche. Jeder Materialfluss wird durch einen (Förder-)Gut, eine Transportmenge, eine Quelle und eine Senke definiert. Jedes Gut hat Maßattribute in Form einer horizontalen und einer vertikalen Länge. Wobei die horizontale Länge immer das längere Kantenmaß eines Gutes widerspiegelt. Das heißt, wenn ein Paket in horizontaler Richtung transportiert wird (in Draufsicht bspw. von Ost nach West), ist die längere Kante parallel zur Flussrichtung. Sofern mehrere Materialflüsse in einem Wegabschnitt parallel bzw. gemeinsam verlaufen, werden diese hinsichtlich ihrer Attribute kombiniert. Die Transportmenge wird addiert. Die Maße der Güter werden in mengengewichtete Durchschnittslängen überführt.

Die Evaluierungsmethoden der Zielkriterien sind so gestaltet, dass immer ein Prozentwert zwischen 0 und 100 zurückgegeben wird. So müssen die einzelnen Zielfunktionswerte weder skaliert noch normiert werden, um einen Vergleich zu ermöglichen. Die Bildung des Prozentwerts erfolgt in den meisten Fällen durch die Bildung des Verhältnisses aus bestem bekannten Zielfunktionswert zu aktuellem Zielfunktionswert eines Zielkriteriums. Nachteil der Methode ist, dass beim Auffinden eines neuen besten Zielfunktionswert alle zuvor berechneten Zielfunktionswerte desselben Zielkriteriums aktualisiert werden müssen. Sofern diese Zielfunktionswerte nicht direkt zur Steuerung der Optimierungsmethode benötigt werden, kann die Aktualisierung auch am Ende der Optimierung erfolgen. Die Gewichtung der Zielkriterien ist ohne Einschränkungen möglich.

Basierend auf der Positionierung der Fördermodule (Bild 3-a) wird zudem ein Graph des Fördersystems abgeleitet (Bild 3-b). Mithilfe dessen können die Transportwege berechnet werden. Hierfür weisen die Fördermodule neben einem Positions- auch ein Rotationsattribut auf. So kann geprüft werden, ob Ein- und Ausgänge der Fördermodule aneinander liegen und somit ein Transport möglich ist. Sofern dies der Fall ist, werden die Knoten der Fördermodule durch eine Kante verbunden. Der Transportweg eines Materialfluss kann durch übliche Wegfindungsalgorithmen bestimmt werden.

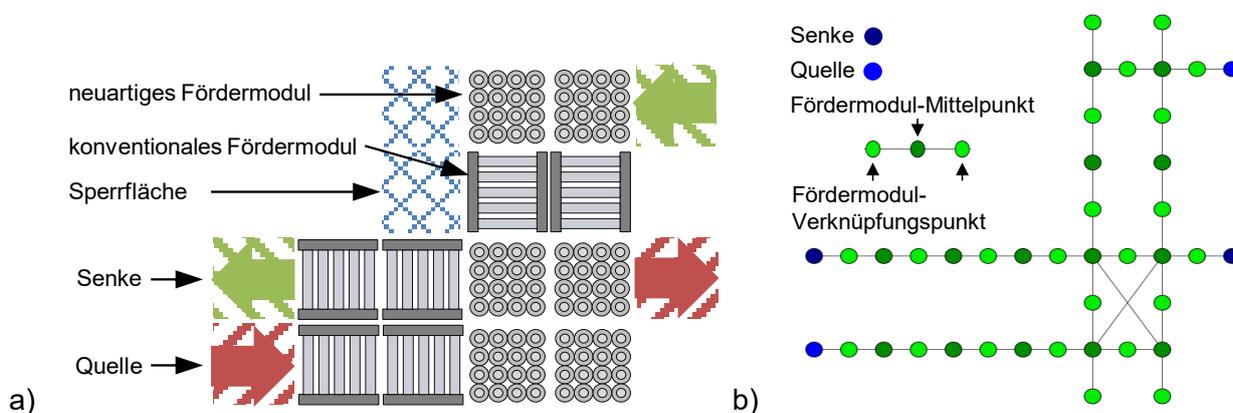


Bild 3: a) Förderanlagenlayout, b) Repräsentation als Graph

### **Durchsatz**

Die Berechnung des Durchsatzes eines Fördersystems ist für einen Materialfluss einfach möglich. Sofern es mehrere Materialflüsse zwischen verschiedenen Quellen und Senken gibt, entstehen je nach Layout komplexe Kreuzungssituationen, für die es keinen einfachen analytischen Ansatz zur Bestimmung des Gesamtdurchsatz gibt. DALLERY UND GERSHWIN sowie LI ET AL. liefern exakte Lösungsansätze für einfache intralogistische Systeme aus Fördertechnik und Maschinen mit einer stationären Verteilung der Transportgüter [Dal92], [Li06]. Diese Ansätze sind nicht für komplexe Fördersysteme mit vielen Fördermodulen geeignet, da die einzelnen Kreuzungssituation aufwendig modelliert werden müssen [Gao21]. Es gibt verschiedene Annährungsverfahren für die Durchsatzberechnung, welche auf dem Zerlegen des Systems in Subsysteme basieren. Hierbei wird für jedes Subsystem ein Durchsatz berechnet. Anschließend werden die Subsysteme wieder verbunden und der Durchsatz des Gesamtsystems wird abgeschätzt. ARNOLD liefert Grundlagen für die Berechnung verschiedener Subsysteme [Arn19]. Es gibt eine Reihe weiterer Methoden, die auf dem Zerlegungsansatz beruhen (vgl. [Gao19], [Sch00]), jedoch ist keine dieser direkt für Fördersysteme mit modularen Förderern anwendbar. SHECHKUTIN entwickelte ebenfalls eine Layoutoptimierung für modulare Fördersysteme. Die Betrachtung erfolgt maßgeblich anhand von netkoPs [Shc19]. Die Durchsatzberechnung basiert auf der losgelösten Berechnung der Durchlaufzeit je Materialfluss. Hierbei werden die Transportzeiten für die verwendeten Förderer aufsummiert. Sofern der Materialfluss über einen Kreuzungspunkt beziehungsweise einen modulare Fördermatrix verläuft, wird die Transportzeit dieser Transportstrecke mit einem Faktor verrechnet. Der Faktor wird für jede Kreuzungssituation anhand der Größe der modularen Fördermatrix berechnet. Dabei wird angenommen, dass eine größere Fördermatrix zur Vereinfachung der Konflikte führt. Die Konflikte selbst werden nicht konkret berechnet. Des Weiteren existieren verschiedene Simulationsmodelle, mit denen der Durchsatz von modularen Fördersystemen berechnet werden kann. Diese wurden entwickelt, um komplexe Steuerungsansätze für den Cellveyor (vgl. [Uri19]), den FlexConveyor (vgl. [May09], [Sei16]) oder die Fördermatrix aus netkoPs zu validieren (vgl. [Krü15], [Krü16], [Soh20], [Soh21]). Die Simulationsmodelle konnten nicht für die Evaluierung des Durchsatzes genutzt werden, da die Anwendung von Simulation zu einer deutlichen Erhöhung der Rechenzeiten der Evaluierung und damit der Optimierung führen würde. Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass keiner der bestehenden Ansätze für die direkte Anwendung im Forschungsprojekt geeignet ist. Daher wurde der nachfolgend präsentierte Ansatz entwickelt. Hierbei wurden selbstverständlich auch bestehende Ansätze wie die Zerlegung adaptiert.

Zur Berechnung des Durchsatzes  $\lambda^q$  eines Fördersystems  $q$  wird ebenfalls der zuvor beschriebene Zerlegungsansatz verwendet. Hierfür werden zunächst die Transportwege der Materialflüsse im Graph auf Kreuzungen überprüft. Bei einem Fördermodul  $f$  handelt es sich um eine Kreuzung  $u$ , wenn zwei oder mehr Materialflüsse nicht dieselben angrenzenden Fördermodule nutzen. Dementsprechend wird ein paralleler Transport auf einer geraden Strecke oder in einer Kurve nicht als Kreuzung betrachtet, sofern die Transportrichtung nicht entgegengesetzt ist. Aus dieser Definition ergeben sich die im Bild 4 dargestellten Kreuzungen.

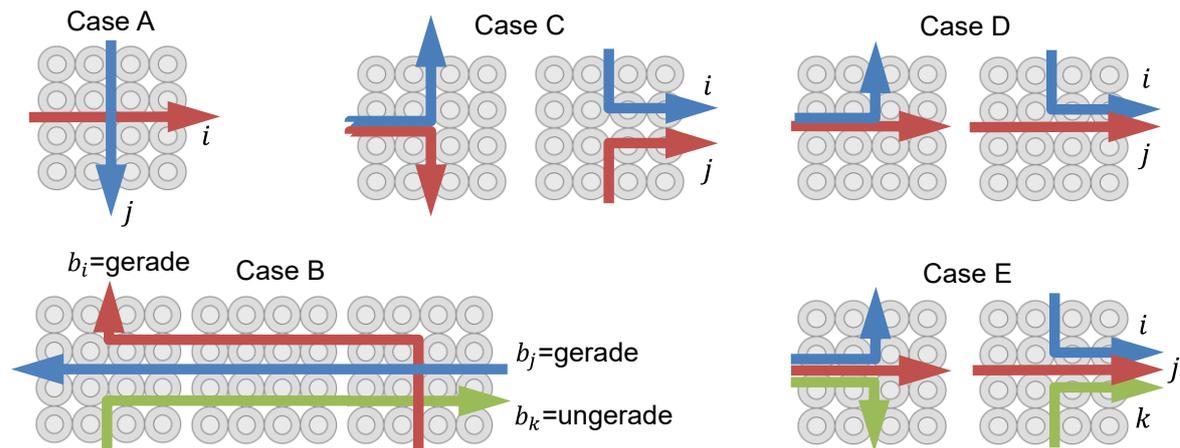


Bild 4: Kreuzungstypen in modularen Förderanlagenlayouts

Bei der Durchsatzberechnung werden anschließend nur die Kreuzungen berücksichtigt (Gleichung 1). Im Allgemeinen gilt, dass der Engpass in einem verketteten System bestimmend für den Durchsatz des Systems ist. Bezogen auf das Fördersystem bedeutet dies, dass die Kreuzung mit dem geringsten Durchsatz bestimmend für das gesamte Fördersystem ist (Gleichung 2). Dies gilt nur, solange sich alle Materialflüsse innerhalb eines Fördersystems kreuzen. Falls mehrere unabhängige Materialflüsse bzw. Materialflusssysteme in einem Fördersystem vorhanden sind, muss der Engpass je Subsystem bestimmt werden. Der Gesamtdurchsatz ist dann die Summe der Engpass-Durchsätze der Subsysteme. Der Zielwert des Durchsatzes kann dann mit Gleichung 3 berechnet werden. Für die Berechnung wird eine Fördergeschwindigkeit von 0,9 m/s angenommen. Die maximalen Geschwindigkeitsangaben der Fördersystemhersteller variieren zwischen 1 und 1,2 m/s. Diese maximale Geschwindigkeit kann durch Beschleunigungs- und Bremsphasen bspw. vor und nach Kurven nicht durchweg realisiert werden [Arn19].

$f$ : Fördermodul mit  $f \in F$

$u$ : Fördermodul auf dem sich Materialflüsse kreuzen  $u \in U$  und  $U \subseteq F$

$\lambda_u$ : Durchsatz einer Kreuzung  $u$

$\lambda^q$ : Durchsatz eines Fördersystems bzw. eines Förderanlagenlayout  $q$

$\lambda^{best}$ : Bester bekannter Durchsatz

$Z_\lambda$ : Ergebniswert des Zielkriteriums Durchsatz

$$\lambda_u = \frac{t_u}{3600} \quad (1)$$

$$\lambda^q = \min(\lambda_u) \forall u \quad (2)$$

$$Z_\lambda = \frac{\lambda^q}{\lambda^{best}} * 100 \quad (3)$$

In den folgenden Unterkapiteln werden Bewertungsformeln für die relevanten Kreuzungssituationen vorgestellt. Grundsätzlich basieren diese auf der Berechnung der Lastspieldauer  $t_u$ . Hierzu werden zunächst die Gütermengen  $a_i$  der Materialflüsse  $i$  miteinander ins Verhältnis gesetzt, um eine Losgröße  $n_i$  zu berechnen. Beispielsweise entsprechen zwei Materialflüsse mit 400 und 600 Stück pro Stunde den Losen 2 und 3 Güter pro Lastspiel. Anschließend wird die Transportdauer  $t_{ui}$  der

Lose durch die Kreuzung berechnet. Diese Berechnung basiert auf der Summierung Wegstrecken der Transportbewegungen. Wegstrecken sind beispielsweise die Fördermodullänge  $s_u$  oder die jeweilige Länge des Transportguts  $l_{iH}$  und  $l_{iV}$ . Die Summe der Wegstrecken wird anschließend durch die Fördergeschwindigkeit  $v_u$  geteilt. Für die Berechnungen werden folgende Parameter verwendet:

$i; j; k$ : Materialfluss mit definiertem Guttyp ( $i \neq j \neq k$ )

$a_i$ : Soll-Menge an Gütern [Stück/Stunde]

$n_i$ : Los bzw. Verhältnis von Materialfluss  $i$  bezogen auf alle Materialflüsse

$m_i$ : Anzahl der Güter im Teillose von Materialfluss  $i$  ( $m_i * l_i < s_u$ )

$g_i$ : Anzahl an Lastspiel zur Abwicklung aller Teillose von Materialfluss  $i$  ( $g_i = \left\lceil \frac{n_i}{m_i} \right\rceil$ )

$l_{iH}$ : Maß eines Pakets von Materialfluss  $i$  in horizontaler Richtung ( $H$ )

$l_{iV}$ : Maß eines Pakets von Materialfluss  $i$  in vertikaler Richtung ( $V$ )

$\overline{l_{iH}}$ : mengengewichtetes Maß eines virtuellen Pakets aus der Kombination mehrerer Materialflüsse  $i$  in horizontaler Richtung ( $H$ )

$\overline{l_{iV}}$ : mengengewichtetes Maß eines virtuellen Pakets aus der Kombination mehrerer Materialflüsse  $i$  in vertikaler Richtung ( $V$ )

$\overline{n_i}$ : Los der Kombination mehrerer Materialflüsse

$v_u$ : Transportgeschwindigkeit eines Fördermoduls  $u$

$s_u$ : Länge bzw. Breite eines Fördermoduls  $u$

$t_u$ : Zeit für ein Lastspiel aller Materialflüsse auf einem Fördermodul  $\sum t_{ui}$

$t_{ui}$ : Zeit in der ein Los  $n_i$  von Materialfluss  $i$  auf einem Fördermodul  $u$  transportiert wird

### **Einfache Kreuzung zweier Materialflüsse (Case A)**

Die einfachste Form der Kreuzung ergibt sich, wenn zwei Materialflüsse ein Fördermodul passieren, wobei die Transportrichtung um  $90^\circ$  versetzt ist. Siehe Bild 4 a). Die Zeit des Ladespiel setzt sich wie folgt zusammen (Gleichung 4). Zunächst durchlaufen alle Güter des Loses von Materialfluss  $i$  den Schnittpunkt. Dazu werden die entsprechenden Längen aufaddiert. Die Losgröße wird mit der Länge der Güter multipliziert und die Strecke über die Kreuzung addiert. Daraus ergibt sich die Gesamtlänge, die bewegt werden muss, damit alle Güter des Loses den Förderer passieren. Dies wird dann auch für den zweiten Materialfluss  $j$  durchgeführt, der in einer um  $90^\circ$  gedrehten Richtung fließt.

$$t_u = \frac{(s_u + n_i * l_{iH}) + (s_u + n_i * l_{jV})}{v_u} \quad (4)$$

### Kreuzung über mehrere Fördermodule (Case B)

Die Erweiterung der einfachen Kreuzung stellt hinsichtlich der Steuerung eines Fördersystems bereits die schwierigste Kreuzungssituation dar. Es handelt sich um eine Kreuzung von Materialflüssen mit entgegengesetzter Richtung. Um ein aufeinander Fahren bzw. Deadlock in der Kreuzung zu vermeiden, müssen die Güter vor Einfahrt in die Kreuzung gestoppt werden. Wie bei anderen Kreuzungen müssen die Güter der Materialflüsse aufeinander warten. Dementsprechend werden alle Fördermodule in der Kreuzungssituation blockiert. Zur Berechnung des Lastspiels muss ebenfalls ermittelt werden, ob die Güter in der Kreuzung einen Richtungswechsel vollziehen, da dies einen Einfluss auf die Wegstrecke hat. Bei einer geraden Anzahl von Richtungswechseln fließen die Güter in der gleichen Richtung aus dem Kreuzungsbereich heraus, in der sie hineingekommen sind (Gleichung 5a). Ist die Anzahl der Richtungswechsel ungerade, müssen die horizontale und vertikale Länge der Güter bei der Berechnung der Transportstrecke einmal berücksichtigt werden (Gleichung 5b). Die Dauer des Lastspiels entspricht der Summe der aufeinanderfolgenden Flüsse (Gleichung 6).

$h$ : Anzahl der Fördermodule  $f$  in einer gegenläufigen Kreuzungssituation

$b_i$ : Anzahl der Abbiegungen ein Materialfluss in einer gegenläufigen Kreuzungssituation ausführt

$$t_{ui} = \frac{(h \cdot s_u + n_i \cdot l_{iV})}{v_u} \text{ oder } t_{uj} = \frac{(h \cdot s_u + n_j \cdot l_{jH})}{v_u} \quad \forall b_i, b_j = \text{gerade Anzahl} \quad (5a)$$

$$t_{uk} = \frac{(h \cdot s_u + n_k \cdot (\frac{l_{kH}}{2} + \frac{l_{kV}}{2}))}{v_u} \quad \forall b_k = \text{ungerade Anzahl} \quad (5b)$$

$$t_u = \frac{t_{ui} + t_{uj} + t_{uk}}{v_u} \quad (6)$$

### Zusammenführung zweier gegenläufiger Materialflüsse (Case C)

Zuvor wurden Kreuzungen beschrieben, bei denen die Materialflüsse vor und nach dem Passieren der Kreuzung unabhängig voneinander sind. Daneben existieren Kreuzungen, bei denen Materialflüsse zusammenfließen oder getrennt werden. Im ersten dieser Fälle (Bild 4, Case A) werden zwei entgegengesetzt fließende Materialflüsse zusammengeführt, wobei beide eine Abbiegebewegung vollziehen. Im zweiten Fall kommen zwei Materialflüsse aus der gleichen Richtung und werden durch eine Abbiegung getrennt. Die Gleichung für die Trennung ist identisch mit der Gleichung für die Zusammenführung (Gleichung 7).

$$t_u = \frac{n_i \cdot (\frac{s_u}{2} + \frac{l_{iV}}{2} + \frac{s_u}{2} + \frac{l_{iH}}{2}) + n_j \cdot (\frac{s_u}{2} + \frac{l_{jV}}{2} + \frac{s_u}{2} + \frac{l_{jH}}{2})}{v_u} \quad (7)$$

### Zusammenführung zweier Materialflüsse durch Abbiegen von $i$ in $j$ (Case D)

Bei einer weiteren Kreuzungssituation des Zusammenführens bzw. Trennens passiert ein Materialfluss die Kreuzung geradlinig. Der zweite Materialfluss biegt in diesen ein. Nachdem Richtungswechsel des Zweiten kann eine gemeinsame Bewegung erfolgen, was den Durchsatz deutlich erhöht. Für die Kreuzungssituation entstehen zwei Unterfälle je nach Losgröße der Materialflüsse. Die nachfolgend dargestellten Bewertungsformeln bzgl. Abbiegern gelten für den Fall, dass der geradlinig verlaufende Materialfluss die Kreuzung horizontal passiert. Durch einen Tausch von  $l_h$  und  $l_v$  kann eine um  $90^\circ$  gedrehte Kreuzungssituation abgebildet werden. Im ersten Fall gibt es mehr horizontale als vertikale Güter (Gleichung 8). Der erste Term des Zählers

beschreibt die vertikale Bewegung eines Gutes vom Materialfluss  $i$  bis zur Mitte des Schnittpunktes. Dabei wird die Transportrichtung des Förderers geändert. Der zweite Term beschreibt die gemeinsame horizontale Bewegung eines Gutes von  $i$  und eines Gutes von  $j$ . Dabei muss nur die Länge des Förderers und die des Gutes von  $j$  berücksichtigt werden, da das Gut  $i$  automatisch bewegt wird. Die beiden Terme und die entsprechenden Bewegungen werden so oft ausgeführt, wie es Güter von  $i$  im Los gibt. Dann wird ein weiterer horizontaler Transport durchgeführt (Term 3). Dabei werden alle anderen Güter von  $j$  transportiert. Da diese Bewegung nahtlos an die letzte Ausführung von Term 2 anschließt, muss die Länge des Förderers nicht erneut berücksichtigt werden.

$$t_u = \frac{n_i * \left(\frac{s_u + l_{iV}}{2}\right) + n_i * (l_{jH} + s_u) + (l_{jH} * (n_j - n_i))}{v_u} \quad \forall n_i \leq n_j \quad (8)$$

Im zweiten Fall (Gleichung 9) gibt es weniger horizontale Güter als vertikale Güter. Der erste Term beschreibt wiederum die vertikale Bewegung eines Gutes von  $i$  zur Mitte des Förderers. Diese Bewegung muss so oft durchgeführt werden, wie es die Losgröße erfordert. Der zweite Term beschreibt die horizontale Bewegung eines Gutes aus  $i$ . Diese muss einzeln ausgeführt werden, wenn kein Gut aus  $j$  für den gemeinsamen Transport zur Verfügung steht. Der dritte Term beschreibt wiederum eine gemeinsame Bewegung eines Gutes von  $i$  und eines Gutes von  $j$ . Die gemeinsame Bewegung kann so oft ausgeführt werden, wie es die Losgröße von  $j$  erfordert.

$$t_u = \frac{n_i * \left(\frac{s_u + l_{iV}}{2}\right) + (n_i - n_j) * \left(\frac{l_{jH} + s_u}{2}\right) + n_j * (l_{jH} + s_u)}{v_u} \quad \forall n_i > n_j \quad (9)$$

### Zusammenfluss dreier Materialflüsse durch Abbiegen von $i$ und $k$ in $j$ (Case E)

Die hier dargestellten Bewertungsformeln basieren auf den zuvor beschriebenen, jedoch für den Fall, dass es einen geradlinigen und zwei entgegengesetzte abbiegende Materialflüsse gibt. Die Bewertungsformeln gelten wiederum für einen horizontalen Fall, wobei für die abbiegenden Materialflüsse  $n_i \geq n_k$  gilt. Für die Kreuzungssituation entstehen drei Unterfälle je nach Losgröße der Materialflüsse. Die beiden Gleichungen 10 und 11 ähneln Gleichung 9, wobei berücksichtigt wird, wie oft Güter aus einem der beiden Materialzuflüsse eine gemeinsame Bewegung mit Gütern aus  $j$  machen. Der erste Term in Gleichung 10 beschreibt eine separate Bewegung der Güter aus einem der Materialzuflüsse über den Förderer. Der zweite Term in den Gleichungen 11 und 12 addiert die vertikale Bewegung der Güter des zusätzlichen Materialstroms  $k$ . In Gleichung 11 beschreibt der zusätzliche letzte Term die horizontale Bewegung der Güter des zusätzlichen Materialstroms  $k$ , die nicht als gemeinsame Bewegung durchgeführt wird, weil nicht genügend geeignete Güter aus der horizontalen Richtung vorhanden sind. Gleichung 12 ist die Anpassung von Gleichung 8, zusätzlich zu der oben beschriebenen Erweiterung wird in den letzten Termen nur die veränderte Anzahl der gemeinsamen und unabhängigen Bewegungen berücksichtigt.

$$t_u = \frac{n_i * \left(\frac{s_u + l_{iV}}{2} + \frac{s_u + l_{iH}}{2}\right) + n_k * \left(\frac{s_u + l_{kV}}{2}\right) + n_j * (l_{jH} + s_u) + (n_k - n_j) * \left(\frac{s_u + l_{kH}}{2}\right)}{v_u} \quad \forall n_i \geq n_k \geq n_j \quad (10)$$

$$t_u = \frac{n_i * \left(\frac{s_u + l_{iV}}{2}\right) + n_k * \left(\frac{s_u + l_{kV}}{2}\right) + n_j * (l_{jH} + s_u) + ((n_i + n_k) - n_j) * \left(\frac{s_u + l_{kH}}{2}\right)}{v_u} \quad \forall n_j > n_i > n_k; n_j < (n_i + n_k) \quad (11)$$

$$t_u = \frac{n_i * \left(\frac{s_u + l_{iV}}{2}\right) + n_k * \left(\frac{s_u + l_{kV}}{2}\right) + (n_i + n_k) * (l_{jH} + s_u) + (n_j - (n_i + n_k)) * (l_{jH})}{v_u} \quad \forall n_j \geq (n_i + n_k) \quad (12)$$

### **Durchlaufzeit**

Die Grundlage der Evaluierung der Durchlaufzeit bildet die Berechnung des Durchsatzes. Auf Grund der bekannten Eingangsgrößen bzw. Parameter eines Fördersystems kann dieses als System mit stabilem Zustand angenommen werden. Hieraus ergibt sich eine zulässige Anwendung von Littles Law aus der Warteschlangentheorie. Littles Law besagt, dass die Durchlaufzeit eines Gutes gleich der durchschnittlichen Anzahl an Teilen im System geteilt durch den durchschnittlichen Durchsatz des Systems entspricht [Lit08]. Die durchschnittliche Anzahl an Teilen im System entspricht der Soll-Menge an zu transportierenden Gütern bzw. dem Soll-Durchsatz.

$\lambda^{soll}$ : Soll-Durchsatz bzw. Summe der Soll-Menge aller Güter ( $a_i$ )

$DLZ^k$ : Durchlaufzeit von Fördersystem  $q$

$DLZ^{best}$ : Beste bekannte Durchlaufzeit

$Z_{DLZ}$ : Ergebniswert des Zielkriteriums Durchlaufzeit

$$DLZ^k = \frac{\lambda^q}{\lambda^{soll}} \quad (13)$$

$$Z_{DLZ} = \frac{DLZ^q}{DLZ^{best}} \quad (14)$$

### **Flächenbedarf**

Der Flächenbedarf eines Förderanlagenlayout kann statisch oder dynamisch berechnet werden. Bei Anwendung der zu entwickelnden Optimierungsmethode muss von Nutzenden ein maximal zulässiger Flächenbedarf definiert werden. Diese erfolgt über die Angabe einer horizontalen Länge  $l_H$  und einer vertikalen Länge  $l_V$ . Bei Verwendung der statischen Methode wird der zulässige Flächenbedarf mit der Summe der Flächen aller eingesetzten Fördermodule ins Verhältnis gesetzt.

$c$ : Zelle der Grundfläche

$x_c, y_c$ : Positionskoordinaten der Zelle  $c$  in der Grundfläche

$x_f, y_f, r_f$ : Positionskoordinaten und Rotation des Fördermoduls  $f$

$Z_{Space}$ : Ergebniswert des Zielkriteriums Flächenbedarf

$$Z_{Space} = \frac{\sum_{f=1}^F l_H^f * l_V^f}{l_H * l_V} * 100 \quad (15)$$

Bei der dynamischen Methode wird die gleiche Formel verwendet, jedoch wird als Nenner die von den eingesetzten Fördermodulen aufgespannte Fläche verwendet. Hierzu müssen die Minima und Maxima der Positionskoordinaten der Fördermodule bestimmt und voneinander subtrahiert werden. Die Menge der Positionskoordinaten in x-Richtung ist  $X$  mit  $x_c \in X$ .

$$l_H = \max(X) - \min(X) \quad (16)$$

$$l_V = \max(Y) - \min(Y) \quad (17)$$

### **Pufferkapazität**

Als Puffer werden Fördermodule angesehen, die von keinem Materialfluss genutzt werden, aber dennoch mit dem Fördersystem verbunden sind. Bei der Analyse des Graphen werden dementsprechend alle Knoten bestimmt, die nicht in der Menge der Knoten der kürzesten Wege der Materialflüsse enthalten sind, die aber direkt mit diesen über eine Kante verbunden sind. Die Anzahl der Puffer des zu prüfenden Fördersystems wird mit der des besten bekannten Fördersystems verglichen.

$Num_b^q$ : Anzahl der Puffer im Fördersystem  $q$

$Num_b^{best}$ : Beste Anzahl an Puffern in allen Fördersystemen

$Z_{Buffer}$ : Ergebniswert des Zielkriteriums Pufferkapazität

$$Z_{Buffer} = \frac{Num_b^q}{Num_b^{best}} * 100 \quad (18)$$

### **Investitionskosten**

Die zur Bewertung berechneten Kosten beziehen sich ausschließlich auf die Kosten der Fördermodule. Die Bestimmung von Einrichtungskosten und Instandhaltungskosten ist für jeden Anwendungsfall individuell. Beispielsweise können die Fördermodule von internem oder externem Personal gewartet werden, wobei unterschiedliche Personalkosten entstehen. Auf Grund der Individualität sind diese Kosten nicht verallgemeinerbar. Bei der Kostenberechnung ist zu beachten, dass verschiedene Fördermodule unterschiedliche Kosten haben können und dass innerhalb eines Fördersystems verschiedene Fördermodule verbaut werden können. Daher kann nicht einfach ein Kostensatz mit der Anzahl der Fördermodule multipliziert werden.

$costs_f$ : Kosten von Fördermodul  $f$

$costs^q$ : Summe der Kosten der Fördermodule in Fördersystem  $q$

$costs^{best}$ : Besten Kosten eines Fördersystems

$Z_{Costs}$ : Ergebniswert des Zielkriteriums Investitionskosten

$$Z_{costs} = \frac{\sum_{f=1}^F costs^f}{costs^{best}} * 100 \quad (19)$$

### **Zielfunktion der Optimierung**

Im Rahmen der Optimierung können je nach Anwenderauswahl mehrere Zielkriterien berücksichtigt werden. Demnach werden mehrere Evaluierungsmethoden angewendet, um eine Lösung bzw. Layoutvarianten zu bewerten. Um bei der Optimierung eine Auswahl treffen zu können, welche Lösungen weiterverwendet werden sollen, ist es notwendig diese zu vergleichen. Hierzu wird eine gewichtete Summe der Zielwerte der relevanten Zielkriterien gebildet (Gleichung 20). Somit erhält jede Lösung einen eindimensionalen Zielwert  $Z_v$ . Die Gewichtungsfaktoren  $\omega$  werden bei der Auswahl der relevanten Zielkriterien festgelegt, wobei die Summe der Gewichtungsfaktoren gleich eins sein muss (Gleichung 20).

$$Z_v = \omega_\lambda \cdot Z_\lambda + \omega_{DLZ} \cdot Z_{DLZ} + \omega_{Space} \cdot Z_{Space} + \omega_{Buffer} \cdot Z_{Buffer} + \omega_{Costs} \cdot Z_{Costs} \quad (20)$$

$$\omega_\lambda + \omega_{DLZ} + \omega_{Space} + \omega_{Buffer} + \omega_{Costs} = 1 \quad \forall \omega \in [0,1] \quad (21)$$

Wie im Antrag des Forschungsvorhabens beschrieben, wurde untersucht, ob eine verallgemeinbare Gewichtung der Zielstellungen festgelegt werden kann. Dies war wegen der Unterschiedlichkeit der möglichen Anwendungsszenarien nicht realisierbar. Deshalb wurden anschließend verschiedene Gewichtungsverfahren recherchiert. Der Paarweiservergleich wurde auf Grund seiner Einfachheit und Anwenderfreundlichkeit ausgewählt.

## **Entwicklung einer Methode zur Optimierung**

Im ersten Schritt des letzten Teilarbeitspakets wurden anhand der Klassifizierung des Optimierungsproblems verschiedene Optimierungsansätze recherchiert. Ausgehend von mehreren Arbeiten zum Stand der Wissenschaft (vgl. [Hos18], [Dri07]) wurden hierbei beispielsweise exakte und heuristische Optimierungsansätze hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit für das zugrundeliegende Facility Layout Problem analysiert. Wegen der komplexen beziehungsweise NP-schweren Problemstellung können exakte Optimierungsansätze nicht verwendet werden, da diese eine unverhältnismäßig hohe Rechenzeit zur Optimierung benötigen würden. Dementsprechend wurde ein heuristischer Optimierungsansatz ausgewählt. Heuristische Optimierungsansätze garantieren, im Gegensatz zu exakten Optimierungsansätzen, das Auffinden des globalen Optimums (optimale Lösung) nicht, jedoch bieten sie einen sehr guten Kompromiss aus notwendiger Rechenzeit und Güte des Optimierungsergebnisses [Dom15]. Der Genetische Algorithmus ist einer der am häufigsten für das Facility Layout Problem verwendeten heuristischen Optimierungsansätze und wurde daher auch für dieses Forschungsprojekt ausgewählt. Darüber hinaus hat die durchführende Forschungsstelle zuvor im Forschungsprojekt „MeFaP“ umfangreiche Erfahrungen bei der Anwendung von Genetischen Algorithmen für die Optimierung eines Facility Layout Problems gesammelt [Aur20]. Der Genetische Algorithmus zeigte die besten Ergebnisse in der breiten Suche. Das heißt der Lösungsraum, welcher die Variationsbreite der Entscheidungsvariablen aufgespannt wird, wurde durch den Genetischen Algorithmus am umfassendsten durchsucht. Dieser Vorteil sollte auch im zugrundeliegenden Forschungsprojekt genutzt werden. Im nächsten Bearbeitungsschritt wurde die Struktur der Optimierungsmethode entworfen. Hierbei wurden aus dem Datenmodell bzw. Beschreibungsformat zunächst notwendige Ein- und Ausgangsdaten abgeleitet. Zusätzlich wurden die Steuerparameter des Genetischen Algorithmus definiert. Anschließend wurden Subheuristiken konzeptioniert. Diese sind notwendig, da es sich beim Genetischen Algorithmus um einen problemunspezifischen Optimierungsansatz, eine sogenannte Metaheuristik, handelt. Dementsprechend steuert der genetische Algorithmus die Optimierung durch das Akzeptieren und Verwerfen von Lösungen bzw. Layoutvarianten. Die Erzeugung von neuen Layoutvarianten, durch Variation der Entscheidungsvariablen (bspw. Verschieben von Fördermodulen innerhalb des Layouts) erfolgt über die Subheuristiken. Hierbei müssen Restriktionen berücksichtigt werden (bspw. Fördermodule dürfen sich nicht überlappen und müssen innerhalb der Layoutgrenzen positioniert werden), welche parallel zu den Subheuristiken entwickelt wurden. Darüber hinaus wurde die Einbindung der Evaluierungsmethoden in den Ablauf der Optimierung festgelegt.

### ***Genetischer Algorithmus***

Der Genetische Algorithmus wurde erstmals von HOLLAND vorgestellt [Hol75]. Genetische Algorithmen ahmen das Verhalten von natürlichen evolutionären Entwicklungsprozessen nach und zählen daher zu den von der Natur inspirierten bzw. naturalogenen Optimierungsansätzen. Im Fokus steht zum einen die Adaption von Prozessen bei Rekombination und Mutation von DNA im Rahmen der Fortpflanzung und zum anderen die Selektion von Individuen entsprechend des von Darwin geprägten „Survival of the fittest“. Neben den Prozessen wird auch die Bezeichnung von Variablen (bspw. Lösungsvarianten) an die Natur angelehnt. Das heißt Lösungen werden als

Individuen bezeichnet und eine Menge von Individuen stellt eine Population dar. Die Optimierung selbst durchläuft mehrere Generationen, wobei aus Elternindividuen (bestehende Lösungen) durch die genannten Fortpflanzungsprozesse Kinderindividuen (neue Lösungen) gebildet werden. Der Ablauf des Genetischen Algorithmus kann Pseudocode 1 entnommen werden. Nähere Informationen und verschiedene Anwendungsbeispiele von Genetischen Algorithmen können den Arbeiten von KENDALL und GENDREAU ET AL. entnommen werden [Bur14], [Gen10].

*Pseudocode 1: Grundlegender Ablauf des Genetischen Algorithmus (vgl. [Aur20])*

---

```

set control parameter  $g$  (number of generations),  $p$  (population size),  $mr$  (mutation rate)
generate initial population  $P$  of layouts  $q \in P$ 
evaluate  $P \rightarrow ZF_q \forall q \in P$ 
sort  $P$  based on  $ZF_q$ 
 $q^* := q$  (set best layout variant  $q^*$ )
for  $i$  in  $g$ :
    generate children-layouts  $q' \in C$  by crossover layouts  $q \in P$ 
    mutate  $q' \in C$  with probability  $mr$ 
    evaluate  $C \rightarrow ZF_{q'} \forall q' \in C$ 
    sort  $q, q'$  on descending  $ZF_{q'}$ 
    select  $p$  layouts for new Population  $P$ 
     $q := q'$  (overwrite  $q$  with  $q'$ )
    if  $ZF_q < ZF_{q^*}$ : ( $\forall q \in P$ )
         $q^* := q$ 

```

---

### Codierung und Decodierung

Die Anwendung des Genetischen Algorithmus erfordert es Förderanlagenlayouts in DNA-Sequenzen zu übersetzen (Codierung), um die Rekombination (Crossover) und Mutation ausführen zu können. Im Anschluss müssen die DNA-Sequenzen wiederum in Layouts transformiert werden (Decodierung), um bspw. die Evaluierung der neu entstandenen Lösungen durchführen zu können. Zur Darstellung der Layouts als DNA-Sequenz wurde der Ansatz des Key Genetic Algorithm (vgl. [Gon15]) adaptiert. Dabei entspricht jedes Gen in der DNA-Sequenz einer Zelle im Förderanlagenlayout. Jedes Gen hält einen Datenpunkt bzgl. des an dieser Stelle positionierten Objekts sowie einen Datenpunkt für dessen Rotation. Das positionierte Objekt kann ein spezifischer Fördermodultyp, ein Arbeitsplatz, eine Sperrfläche oder eine freie Zelle sein. Nur im ersten Fall ist die Angabe der Rotation notwendig, in allen weiteren wird diese mit null angegeben.

### Initialisierung

Für die Initialisierung der ersten Generation von Lösungen wurden drei unterschiedliche Subheuristiken entwickelt. Bei der ersten Initialisierungsmethode werden alle Zellen im Layout mit einem modularen Fördermodul belegt. Die zweite Initialisierungsmethode basiert auf dem A\*-Algorithmus, einem sogenannten Kürzeste-Weg-Algorithmus. Hierbei wird zwischen allen Quellen und Senken, die durch einen Güterstrom verknüpft sind, ein Weg im Zellenraster des Förderanlagenlayouts berechnet. Alle zu diesem Weg gehörenden Zellen werden anschließend mit einem mo-

dularen Fördermodul belegt. Beide Initialisierungsmethoden haben gemein, dass sie für alle Güterströme einen zulässigen Transportweg ermöglichen, sofern dies nicht durch (fehlpositionierte) Sperrflächen oder Arbeitsplätze ausgeschlossen ist. Die dritte Initialisierungsmethode basiert auf einer zufälligen Positionierung von modularen und konventionellen Fördermodulen. Dabei wird für jede Zelle im Förderanlagenlayout zufällig entschieden, ob diese durch ein Fördermodul belegt wird, welcher Fördermodultyp verwendet wird und mit welcher Rotation dieses positioniert wird.

### **Rekombination (Crossover)**

Bei der Rekombination werden die DNA-Sequenzen zweier Elternindividuen vermischt, um neue Kinderindividuen zu erzeugen. Nach und nach werden jeweils zwei Elternindividuen zufällig ausgewählt, bis alle Elternindividuen genau einmal an einer Rekombination beteiligt waren. Die Rekombination selbst basiert auf einem Two-Point-Crossover. Das heißt die DNA-Sequenzen der Elternindividuen werden jeweils an den gleichen zwei Punkten aufgetrennt und die Gene innerhalb der Schnittpunkte werden zwischen den Individuen ausgetauscht, wodurch zwei neue Kinderindividuen entstehen. Die Position des ersten Schnittpunkts wird zufällig gewählt. Über einen Parameter, der die Länge des zu vertauschenden Genabschnitts darstellt, wird der zweite Schnittpunkt festgelegt. Genauer wird eine ganzzahlige Zufallszahl zwischen 1 und dem individuell einstellbaren Parameter gewählt.

### **Mutation**

Im Anschluss an die Rekombination erfolgt die Mutation. Zunächst wird mit Hilfe eines individuell einstellbaren Parameters entschieden, ob bei einem Kinderindividuum eine Mutation erfolgen soll, indem dieser mit einer Zufallszahl  $\{0,1\}$  abgeglichen wird. Sofern dies der Fall ist, wird zufällig ein Gen in der DNA-Sequenz ausgewählt und verändert. Wenn das gewählte Gen einen Arbeitsplatz oder eine Sperrfläche repräsentiert, wird zufällig ein anderes Gen ausgewählt, da Arbeitsplätze und Sperrflächen fixiert sind. Dementsprechend sind auch deren Gene fixiert. Anschließend an die Auswahl des Gens werden die beiden Datenpunkte des Gens zufällig neu beschrieben, wobei der erste Datenpunkt nur mit einem Fördermodultypen oder als freie Zelle belegt werden kann. Durch eine ganzzahlige Zufallszahl zwischen 1 und einem individuell einstellbaren Parameter wird festgelegt, wie viele Gene maximal mutiert werden sollen.

### **Selektion**

Für die Selektion wurden die „best fitness selection“ und das „stochastic universal sampling“ adaptiert (vgl. [Bur14]). Bei der einfachen „best fitness selection“ werden alle Individuen (Eltern- und Kinderindividuen) anhand ihres Zielwerts  $Z_v$  absteigend sortiert. Anschließend werden entsprechend der Populationsgröße die besten Individuen der neuen Generation hinzugefügt.

Das „stochastic universal sampling“ ist eine Adaption der weitverbreiteten „roulette wheel selection“ und entspricht dem Werfen von  $P$  (Populationsgröße) äquidistanten Kugeln auf ein Roulettkessel, dessen Kammern entsprechende der Zielwert  $Z_v$  dimensioniert sind. Für das „stochastic universal sampling“ wird zunächst die Summe aller Zielwerte  $Z_v$  gebildet. Anschließend wird ein Abstandsmaß berechnet, indem die Summe der Zielwert durch die Populationsgröße geteilt wird. Daraufhin wird zufällig der erste Selektionspunkt berechnet, welcher zwischen null und dem Abstandsmaß liegt. Ausgehend vom ersten Selektionspunkt werden alle weiteren Selektionspunkte berechnet, indem das Abstandsmaß entsprechend der Anzahl der Populationsgröße oft aufaddiert wird. Demnach sind die Selektionspunkte ein Vielfaches des ersten Selektionspunkts. Im Anschluss werden die Zielwerte  $Z_v$  kumuliert. Abschließend werden die Selektionspunkte mit den kumulierten Zielwerten verglichen und dementsprechend die Individuen der neuen Generation gewählt.

## Steuerparameter

Anhand von Validierungsexperimenten, welche im Rahmen der Evaluierung des Planungstools erfolgten (vgl. Kapitel 4.4), wurden die in Tabelle 3 dargestellten Standardwerte der Steuerparameter ausgewählt. Diese werden im Planungstool automatisch angewendet, können aber von Anwendenden angepasst werden.

Tabelle 3: Standard-Steuerparameter des Genetischen Algorithmus

Steuerparameter	vorgeschlagener Wertebereich (Standardwert)
Generationsanzahl	1000 - <b>2500</b>
Populationsgröße	25 - <b>50</b>
Crossover-Distanz	<b>2</b> - 5 (Two-point crossover)
Mutation-Rate	0,75 - <b>0,90</b>
Mutationsverfahren	<ul style="list-style-type: none"> <li>• zufällige Positionierung eines Fördermoduls</li> <li>• zufälliges Löschen eines Fördermoduls</li> </ul>

## 4.3 Implementierung des Planungstools

Die Umsetzung der Arbeitsschritte der Unterarbeitspakete 3.1 bis 3.3 wird gemeinsam beschrieben, da die Implementierung ebenfalls simultan erfolgte.

Im ersten Arbeitsschritt wurde die Softwarearchitektur entworfen. Hierbei wurden die Anforderungen aus dem Lastenheft, das Datenmodell bzw. Beschreibungsformat sowie die Struktur von Evaluierungs- und Optimierungsmethoden berücksichtigt. Als Programmiersprache wurde python ausgewählt, da diese lizenzfrei angewendet werden kann und auf Grund ihrer weiten Verbreitung eine interne, wie externe Weiterentwicklung des Planungstools vereinfacht. Im zweiten Arbeitsschritt erfolgte die Implementierung des Planungstools. Diese wurde in Front-End- und Back-End-Entwicklung aufgeteilt.

Das Front-End umfasst die Bedienoberfläche (Bild 5), auch GUI (Graphical User Interface) genannt, sowie alle zugehörigen Funktionen zur Interaktion. Entsprechend der Anforderung aus dem Projektantrag wurde darauf geachtet, einen niedrighwelligen Zugang zu gewährleisten. Dementsprechend wurden die notwendigen Nutzereingaben so strukturiert und implementiert, dass Anwendende durch automatische Abfragen intuitiv durch das Planungstool geleitet werden. Hierzu wurden entsprechende Eingabefenster und Visualisierungen programmiert. So erfolgt nach dem Start des Planungstools das Anlegen eines neuen Layouts durch die Definition der Flächengrundmaße und Zellengröße sowie der Festlegung von Ausschnitten bzw. der Kontur der Grundfläche. Im Anschluss können Quelle und Senken sowie Sperrflächen und potenziell angrenzende Arbeitsplätze eingeplant werden. Daraufhin werden die Güterströme definiert, wobei Quellen und Senken mit zu transportierenden Gütern verknüpft werden. Nach Abschluss der Erstellung eines Planungsfalls kann die Optimierung ausgelöst werden. Bevor diese startet, werden noch die Gewichtung der Zielkriterien und die bei Optimierung verfügbaren Fördermodule abgefragt. Des Weiteren können die Steuerparameter der Optimierung editiert werden. Um eine aufwendige Einarbeitung diesbezüglich zu verhindern, wurden Standardwerte als eine Art Werkseinstellung festgelegt. Nach der Optimierung werden die besten Layoutvarianten in einer Übersicht mit ihren Ergebniswerten dargestellt. Zudem gibt es eine tabellarische Aufstellung der Ergebnisse. Neben der Optimierung ist es ebenfalls möglich manuell Layoutvarianten zu erstellen und zu bewerten. Dies ermöglicht die Evaluierung bestehender Fördersysteme und bietet so eine Grundlage für den Vergleich mit optimierten Layoutvarianten. Selbstverständlich können Layouts

in allen Planungszuständen gespeichert und auch wieder geladen werden.

Das Back-End umfasst alle in Kapitel 4.2 beschriebenen Methoden zur Evaluierung und Optimierung von modularen Förderanlagenlayouts. Zudem enthält das Back-End alle Funktionen, die notwendig sind, um Förderanlagenlayouts zu erstellen und zu editieren (bspw. Positionierung einzelner Fördermodule, Prüfung von Restriktionen oder Planung von Transportwegen).

Abschließend wurden Front- und Back-End zusammengeführt.

Eine ausführbare Version des Planungstools ist auf der Projekthomepage zum Download verfügbar ([https://www.iph-hannover.de/de/forschung/forschungsprojekte/?we\\_objectID=5690](https://www.iph-hannover.de/de/forschung/forschungsprojekte/?we_objectID=5690)). Der zugehörige Programmiercode wurde Open-Source unter der Softwarelizenz European Union Public Licence V. 1.2 veröffentlicht, um eine barrierefreie Weiterentwicklung zu gewährleisten ([https://gitlab.com/iph-group/lo\\_aif\\_optilay\\_2020/optilay](https://gitlab.com/iph-group/lo_aif_optilay_2020/optilay)).

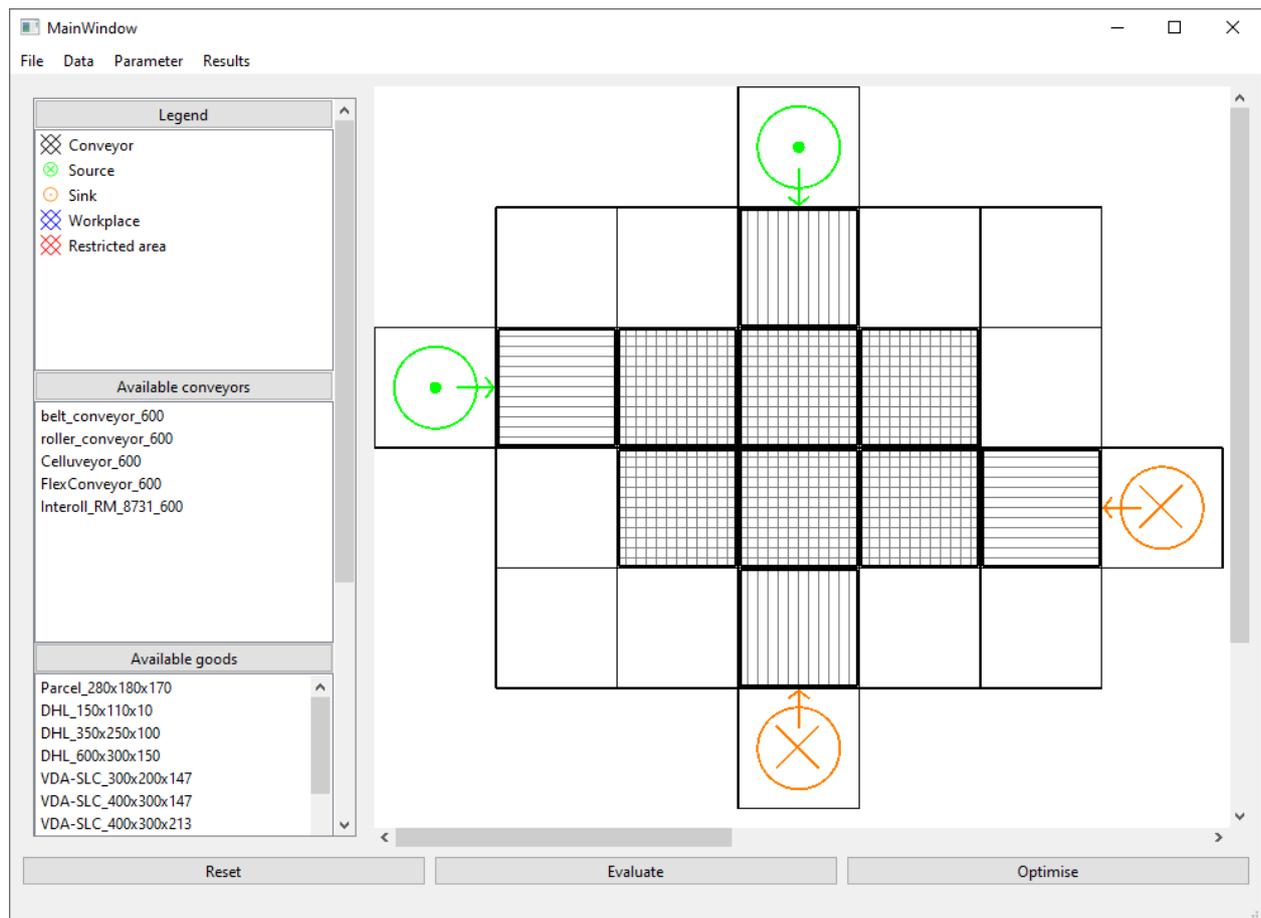
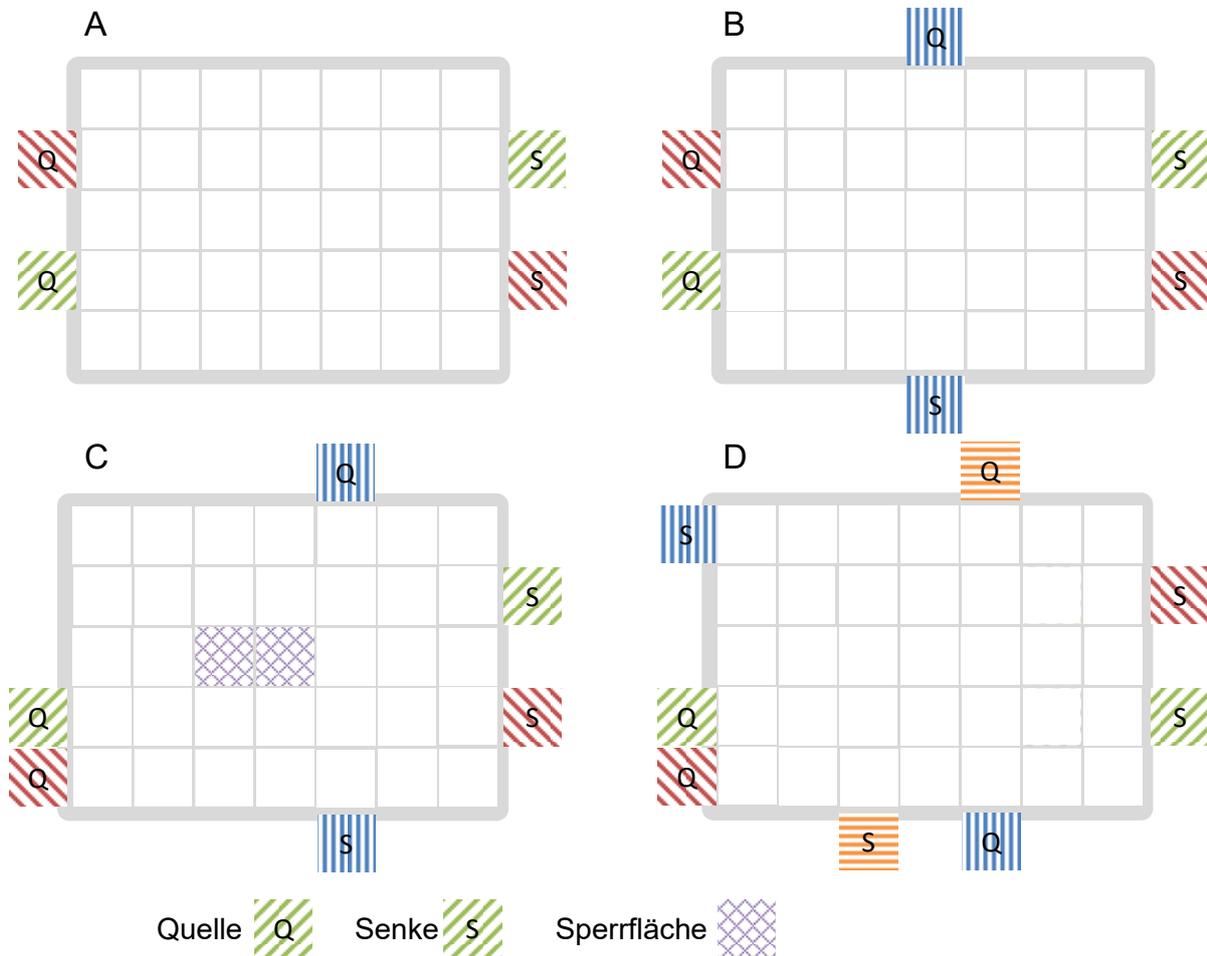


Bild 5: Bedienoberfläche des Planungstools mit einem einfachen geplanten Layout

#### 4.4 Evaluierung der Planungstools

Im ersten Arbeitsschritt der Evaluierung des Planungstools erfolgte eine Verifikation der Evaluierungs- und Optimierungsmethoden. Das heißt es wurde geprüft, ob die Implementierung der Methoden deren Konzeptionierung entspricht. Zur Verifikation der Evaluierungsmethoden wurden manuell verschiedene Testfälle bzw. Layouts erstellt (bspw. Modellierung von einzelnen Kreuzungssituationen) und anschließend mit dem Planungstool bewertet. Parallel erfolgte eine manuelle Berechnung der zu prüfenden Zielgrößen. Anschließend wurden die Evaluierungsergebnisse abgeglichen. Hierbei wurden keine signifikanten Abweichungen festgestellt. Die Verifikation der Optimierungsmethoden erfolgt in zwei Prüfschritten. Zunächst wurde durch Einzelschrittbetrachtung und strukturiertes Durchgehen geprüft, ob alle Restriktionen (bspw. Fördermodule dürfen

nicht überlappen oder Fördermodule müssen innerhalb der Layoutgrenzen liegen) eingehalten werden. Anschließend wurde untersucht, ob die Evaluierungsergebnisse im Lauf der Optimierung verbessert werden. Im zweiten Arbeitsschritt erfolgte eine Evaluierung anhand manuell ausgelegter Anlagenlayouts. Hierzu wurden vier unterschiedlich komplexe Testfälle entwickelt (Bild 6), wobei nur die Größe des Layouts, die verfügbaren Fördermodule, die Positionen von Quellen und Senken sowie Güterströme mit unterschiedlichen Transportmengen (Case 1 und 2) festgelegt wurden.



	Case 1 (Stück/h)	Case 2 (Stück/h)	Paketgröße (mm)
	2000	2700	600x400
	3000	4050	400x300
	4300	5700	280x180
	3450	4600	350x250

— Zellengröße: 600x600 mm

— Geschwindigkeit: 0,9 m/s

— Ein- und Ausgänge liegen  
angrenzend an das Layout

Bild 6: Übersicht der Testfälle für die Evaluierung des Planungstools

Der theoretische maximale Durchsatz pro Stunde, also eine Förderung ohne Kreuzungen und ohne Abstand zwischen Gütern würde bei einem Gut mit einer Kantenlänge von 600 mm bei einer Fördergeschwindigkeit von 0,9 m/s genau 5400 Stück pro Stunde betragen (grüner Güter-

strom in Bild 6). Um Stauung und Beschädigungen bspw. durch Auffahren in Kurven zu vermeiden, werden in der Praxis oft Sicherheitsabstände eingeführt. Die Transportmengen in Case 2 entsprechen der Hälfte des theoretischen maximalen Durchsatzes. Der Sicherheitsabstand ist demnach so groß wie die Kantenlänge des jeweiligen Pakets. Die Transportmengen in Case 1 entsprechen einer Reduzierung um 75 % im Vergleich zu Case 2. Mit diesen Testfällen erfolgte dann eine manuelle Planung durch Unternehmen des Projektbegleitenden Ausschuss sowie eine Anwendung des Planungstools. Die Planungsergebnisse wurden anschließend verglichen und auf Plausibilität geprüft. Zunächst wurde geprüft, ob die Evaluierungsergebnisse des Planungstools mit denen der von Experten durchgeführten Berechnungen übereinstimmen. Anschließend wurden untersucht, ob die durch das Planungstool erzeugten Layouts praxistauglich sind. Die Optimierungsergebnisse, der mit dem Planungstool durchgeführten Experimente, sind in Bild 7 und Tabelle 4 dargestellt.

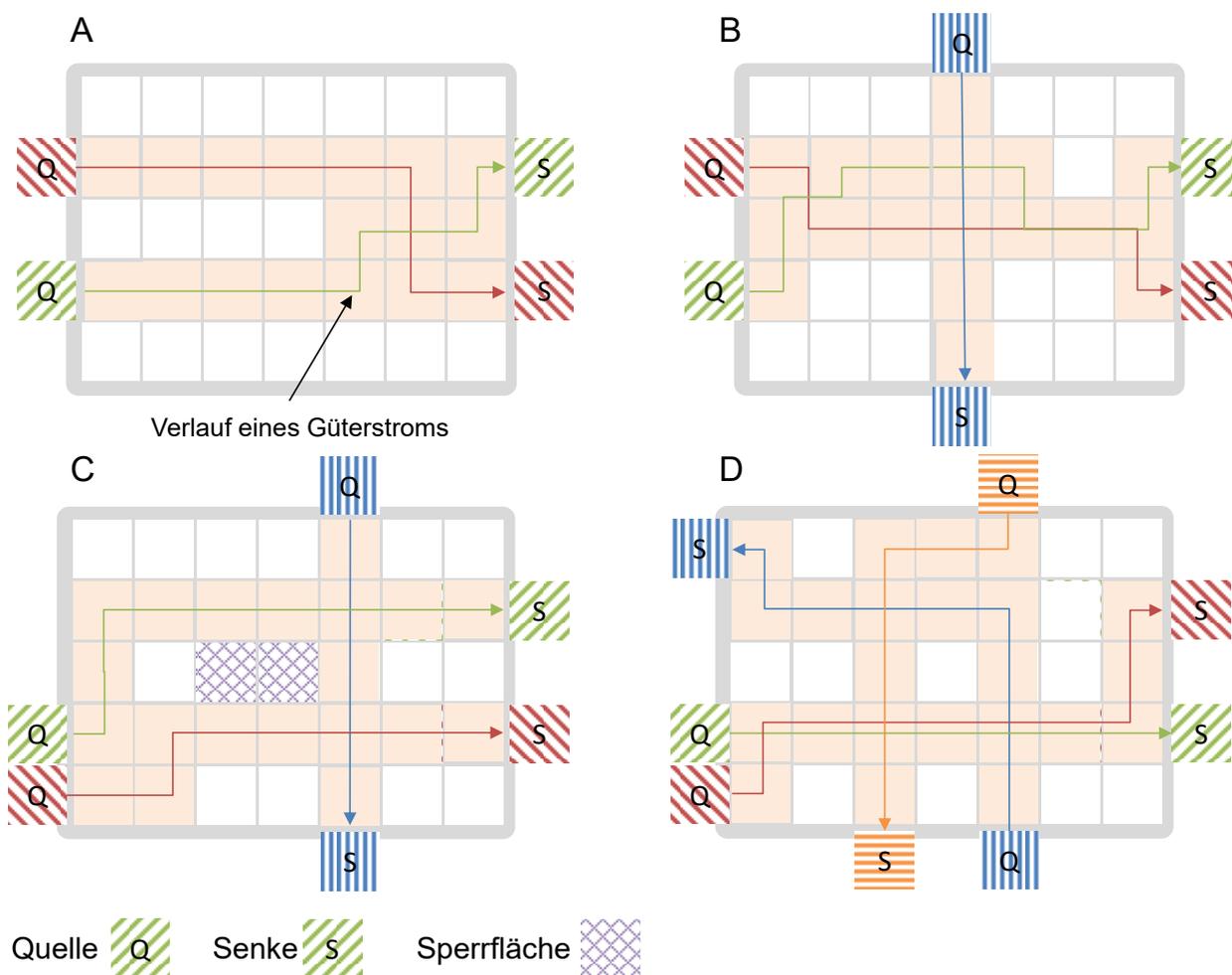


Bild 7: Schematische Darstellung der Förderanlagenlayouts (Ergebnisse des Planungstools)

Die Ergebnisse in Tabelle 4 zeigen, dass für alle Testfälle (A bis D) ein Layout erstellt wurde, mit dem es möglich ist, die geforderten Transportmengen aus Case 1 vollständig fördern zu können. Die Transportmengen aus Case 2 konnten dagegen nicht vollständig gefördert werden. Es konnten keine anderen Layoutvarianten gefunden werden, die einen höheren Durchsatz ermöglicht hätten. Entsprechend des in Kapitel 4.2 beschriebenen Vorgehens wurden die Transportmengen auf die maximalen Durchsätze der Engpasskreuzungen reduziert. Bzgl. Testfall B mit der Trans-

portmenge aus Case 2 wurde deutlich, dass kleine Pakete priorisiert werden. Da der Gesamtdurchsatz aller Güterströme durch die Maximierung der Zielgröße optimiert wird, ist es besser viele kleine Güter zu fördern als wenige große, da in Summe mehr Stück gefördert werden.

Tabelle 4: Ergebnisse der Validierungsexperimente (Planungstool)

		Durchsätze in Case 1					Durchsätze in Case 2						
Soll		Gesamt					Soll	Gesamt					
A	5.000	5.000	2.000	3.000			6.750	6.220	2.490	3.730			
B	9.300	9.300	2.000	3.000	4.300		12.450	8.900	1.280	1.920	5.700		
C	9.300	9.300	2.000	3.000	4.300		12.450	10.510	2.580	3.290	4.640		
D	12.750	12.750	2.000	3.000	4.300	3.450	17.050	14.290	2.610	3.280	4.610	3.790	

Darüber hinaus sollte nach Projektantrag ein Vergleich zu bestehenden konventionellen Anlagenlayouts erfolgen. Hierzu sollten zunächst bestehende konventionelle Anlagenlayouts bzgl. der Zielgrößen analysiert werden. Daraufhin sollte mit dem Planungstool eine Optimierung der Anwendungsfälle unter Nutzung von modularen Fördermodulen erfolgen. Anschließend sollte anhand der Kennzahlen bzw. Zielgrößen abgeleitet werden, welchen Nutzen bzw. welche Potentiale der Einsatz modularer Fördertechnik hat. Da entsprechende konventionelle Förderanlagen bei den Unternehmen des Projektbegleitenden Ausschuss nicht verfügbar waren, konnte diese Untersuchung nicht durchgeführt werden.

#### 4.5 Ergebnisdokumentation und Veröffentlichung

Die erzielten Ergebnisse wurden während der Projektlaufzeit dokumentiert und veröffentlicht. Die Veröffentlichungen erfolgten durch Artikel in Fachzeitschriften sowie bei der Vorstellung auf unterschiedlichen Veranstaltungen. Die Dokumentation unterstützt die Anwendung des Planungstools und hilft damit bei der Verbreitung der Ergebnisse über den PA hinaus. Eine Auflistung der Veröffentlichungen sowie der Transfermaßnahmen ist in Kapitel 8 zu finden.

### 5. Verwendung der Zuwendung

- wissenschaftlich-technisches Personal (Einzelansatz A.1 des Finanzierungsplans)
  - 1 wissenschaftliche/r Mitarbeiter/in (HPA A) mit besonderen Kenntnissen in der Anwendung multikriterieller Optimierungsverfahren und Behandlung des Facility Layout Problem für 24 Monate
  - 1 wissenschaftlich-technischer Mitarbeiter (HPA A) mit besonderen Kenntnissen im Bereich Softwareentwicklung für 1 Monate
  - 1 wissenschaftlich-technischer Mitarbeiter (HPA B) mit besonderen Kenntnissen im Bereich Softwareentwicklung für 7 Monate
- Hilfskräfte (Einzelansatz A.3 des Finanzierungsplans)
  - wissenschaftliche Hilfskräfte (HPA F) als Unterstützung bei der Projektbearbeitung für 829 Stunden.
- Geräte (Einzelansatz B des Finanzierungsplans)
  - keine Geräte angeschafft
- Leistungen Dritter (Einzelansatz C des Finanzierungsplans)
  - keine Leistungen Dritter in Anspruch genommen

## **6. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit**

Die geleistete Arbeit entspricht dem bewilligten Arbeitsplan und war für die Erreichung der im Projekt angestrebten Ziele notwendig. Die durchgeführten Tätigkeiten ermöglichten die Erfüllung der geplanten Ergebnisse der Arbeitspakete und bildeten die Grundlage zur Erreichung der Projektziele. Die Notwendigkeit der geleisteten Arbeit begründet sich darüber hinaus durch eine große Praxisrelevanz. Aus den Diskussionen des PA sowie basierend auf eigenen Erfahrungen der durchführenden Forschungsstelle wurde deutlich, dass speziell KMU mit der Auswahl und Planung von Fördersystemen und der damit verbundenen Investitionsentscheidung überfordert sind und auf externe Berater zugehen oder die Entscheidung subjektiv treffen. Diese Forschungslücke schließt sich mit der erarbeiteten Methode.

Die *Angemessenheit* des Projekts und damit der Arbeitsschritte ergibt sich aus der sachgemäßen Bearbeitung der Teilziele. Als Ergebnis wurde ein Planungstool bereitgestellt, welches produzierende Unternehmen bei der Planung und Bewertung eines Förderanlagenlayouts unterstützt und damit direkt in der Industrie angewendet werden kann. Für die Entwicklung des Planungstools war die gründliche Bearbeitung der Arbeitspakete und das Verwenden von wissenschaftlichen Methoden ein wichtiger grundlegender Faktor. Die Ergebnisse der einzelnen Arbeitspakete mussten so aufgearbeitet werden, dass sie im Rahmen der Implementierung des Planungstools programmiert werden konnten. Die geleistete Arbeit entspricht dem begutachteten sowie bewilligten Antrag und war daher für die Durchführung des Vorhabens notwendig und angemessen.

## **7. Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen**

Die Forschungsergebnisse liefern praxisorientierte Lösungen für produzierende Unternehmen sowie Hersteller von modularen Fördersystemen. Durch die Nutzung der Optimierungsmethode beziehungsweise des Planungstools als objektive Entscheidungsunterstützung werden KMU in die Lage versetzt, stets ein hochwertiges Layout zu ermitteln. Hierdurch können die in Kapitel 2 beschriebenen Vorteile realisiert und die Wirtschaftlichkeit eines Unternehmens erhöht werden. Der Vorteil der neuen Methode liegt in einer erhöhten Planungs- und Entscheidungssicherheit, wodurch das Risiko einer unwirtschaftlichen Förderauswahl durch Fehlplanungen vermieden wird. Ferner kann der notwendige Planungsaufwand deutlich reduziert werden. Des Weiteren ist ein Einsatz zur Unterstützung von Entscheidungs- und Auswahlprozessen im Rahmen konventioneller manueller Planungen denkbar (bspw. automatisierte Generierung eines Layouts als Vergleich zu manuell erstellten, um etwaige bislang nicht erkannte Anordnungsmöglichkeiten zu identifizieren). Darüber hinaus kann durch die quantitative Bewertung eines bestehenden Förderanlagenlayouts und dessen Vergleich mit einer automatisch generierten und bewerteten Layoutvariante schnell abgeschätzt werden, ob eine Rekonfiguration wirtschaftliche Vorteile bietet. Die multikriterielle Zielstellung befähigt Unternehmen zukünftig, eine Planung von modularen Fördersystemen ganzheitlich durchzuführen.

Des Weiteren ermöglicht die Dokumentation der Softwarearchitektur und die quelloffene Bereitstellung des Planungstools dessen Weiterentwicklung bzw. Weiterverwendung. So können durch andere Forschungsinstitute oder Unternehmen mit geringem Aufwand weitere Evaluierungs- oder Optimierungsmethoden für modulare Förderanlagenlayouts implementiert und validiert werden.

## 8. Veröffentlichungen und Transfermaßnahmen

Erste Schritte zum Ergebnistransfer wurden bereits während der Projektlaufzeit durchgeführt. Weitere Maßnahmen zur Verwertung und Verbreitung der Projektergebnisse sind im Anschluss an das Forschungsprojekt geplant. Über den Austausch zwischen Forschungsstelle und den Unternehmen des PA sowie weiteren interessierten Unternehmen hat bereits ein erster Wissenstransfer stattgefunden. Dieser ist die Basis für die praktische Umsetzbarkeit der Ergebnisse. Die Mitglieder des PA bestanden aus produzierenden Unternehmen und Herstellern von modularen Fördersystemen.

Die bereits durchgeführten sowie noch geplanten Transfermaßnahmen können dem Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft in Tabelle 5 und Tabelle 6 entnommen werden.

Tabelle 5: Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft (spezifisch durchgeführt Transfermaßnahmen)

Maßnahme	Ziel	Ort/Rahmen	Zeitraum
Projektbegleitender Ausschuss	Unmittelbarer Ergebnistransfer in die Wirtschaft, Erfahrungsaustausch	Abstimmungstreffen des Projektbegleitenden Ausschuss: Vorstellung des Forschungsvorhabens, Diskussion der ersten Ergebnisse und Workshop zur Lastenhefterstellung	21.06.2021
		Abstimmungstreffen des Projektbegleitenden Ausschuss: Vorstellung und Diskussion, der analytischen Evaluierungsmethoden sowie des Optimierungskonzepts bzw. der heuristischen Lösungsmethode	15.12.2021
		Abstimmungstreffen des Projektbegleitenden Ausschuss: Vorstellung des Planungstools und Diskussion der Ergebnisse von Validierungsexperimenten	24.03.2022
		Arbeitstreffen mit Unternehmen des Projektbegleitenden Ausschusses: Diskussion, Datenaufnahme	gesamte Projektlaufzeit
Ansprache potenziell interessierter Unternehmen außerhalb des PA	Gewinnung für die Teilnahme am PA und unmittelbarer Ergebnistransfer in die Wirtschaft	Vorstellung der Projektziele und erzielter Ergebnisse bei interessierten Unternehmen vor Ort sowie fernmündlich	gesamte Projektlaufzeit
Versorgung der interessierten Fachöffentlichkeit, im besonderen KMU, mit Informationen	Ergebnistransfer in die Wirtschaft	Einrichtung einer Projekthomepage: <a href="http://optilay.iph-hannover.de">http://optilay.iph-hannover.de</a>	04/2020
		Pressemitteilung zum Projektbeginn: „Förderanlagen: Mehr Flexibilität durch optimierte Layouts“	14.07.2020
		Veröffentlichung: Aurich, P.; Stonis, M.; Overmeyer, L.: Layoutoptimierung für kleinskalige modulare Förderanlagen. In: ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, Carl Hanser Verlag, 116 Jg. (2018), H. 4, S. 117-120. <a href="https://doi.org/10.1515/zwf-2021-0048">https://doi.org/10.1515/zwf-2021-0048</a>	30.04.2021

Maßnahme	Ziel	Ort/Rahmen	Zeitraum
		Veröffentlichung: Aurich, P.; Böning, C.; Stonis, M.; Overmeyer, L.: Throughput Analysis for Layout Optimisation of Modular Conveyor Systems. In: Herberger, D.; Hübner, M. (Eds.): Proceedings of the Conference on Production Systems and Logistics: CPSL 2022. Hannover : publish-Ing., 2022, S. 329-329. DOI: <a href="https://doi.org/10.15488/12196">https://doi.org/10.15488/12196</a>	12/2021
Weiterbildung	Akademische Ausbildung	Betreuung der Masterarbeit: „Modellierung und Simulation von kleinskali- gen, modularen Fördersystemen zur Analyse und Evaluierung von Förderanlagenlayouts“	04/2020 - 09/2020
		Betreuung der Masterarbeit: „Modelling and simulation of small-scale, modular conveyor systems for the analysis of logistic performance indicators“	05/2020 - 11/2020
		Betreuung der Bachelorarbeit: „Entwicklung eines Beschreibungsformats zur einheitlichen und übergreifenden Model- lierung von modularen Förderanlagenlayouts“	03/2021 - 09/2021
		Anstellung von studentischen Hilfskräften	gesamte Pro- jektlaufzeit

Tabelle 6: Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft (spezifisch geplante Transfermaßnahmen)

Maßnahme	Ziel	Ort/Rahmen	Zeitraum
Projektbegleitender Ausschuss	Unmittelbarer Er- gebnistransfer in die Wirtschaft, Er- fahrungsaustausch	Durchführung von weiterführenden Validie- rungsexperimenten zur stetigen Weiterent- wicklung des Planungstools	04/2022 ff.
Versorgung der in- teressierten Fachöffentlichkeit, im besonderen KMU, mit Informati- onen	Ergebnistransfer in die Wirtschaft und Wissenschaft	Pressemitteilung zum Projektende	04/2022
		Vorstellung der Projektziele und erzielter Er- gebnisse bei interessierten Unternehmen vor Ort und fernmündlich	04/2022 ff.
		Veröffentlichung in Fachzeitschrift (VDI-Z o. ä.): geplante Themenschwerpunkt: - Vorstellung der Planungsmethode - Vorstellung der Validierungsexperimente	06/2022
	Akademische Aus- bildung	Wissenschaftliche Qualifikation des Projekt- bearbeiters und Weiterverwendung der Pro- jektinhalte zur Unterstützung der Anfertigung einer Dissertationsschrift	04/2022 ff.
Integration in den Vorlesungsbetrieb der Uni- versität Hannover, bspw. in die Vorlesung Int- ralogistik sowie Transporttechnik des Instituts für Transport- und Automatisierungstechnik		10/2022 ff.	

Maßnahme	Ziel	Ort/Rahmen	Zeitraum
Weiterentwicklung des Planungstools	Bereitstellung der aktuellsten Version des Planungstools	bspw. Integration weiterer Fördersysteme oder Zielgrößen	04/2022 ff.
Nutzung des Planungstools in eigenen Dienstleistungsprojekten	Effizienzsteigerung der Projekte	Beratungsangebote des IPH an interessierte KMU	04/2022 ff.

## 9. Einschätzung der Realisierbarkeit der geplanten Maßnahmen

Die Methode zur automatisierten Erstellung optimierter Förderanlagenlayouts für modulare Förderersysteme bietet KMU die Möglichkeit aufwandsarm Planungsentscheidungen zu treffen bzw. aktuelle Layouts von Fördersystemen zu hinterfragen, um so Investitionsentscheidungen abzusichern. Die Anwendung der entwickelten Methode ist für KMU einfach. Für die Nutzung sind keine zusätzlichen Investitionen (z. B. Gerätebeschaffungen, Beratungsleistungen) nötig. Das in diesem Vorhaben entwickelte Planungstool ermöglicht eine aufwandsarme Anwendung der Ergebnisse. Zur Nutzung ist lediglich die Installation des betriebssystemunabhängigen Planungstools notwendig. Dies ist insbesondere für KMU mit begrenzten Ressourcen relevant. Da das IPH bezüglich Forschung und Beratung für Potentialanalysen von Automatisierungslösungen überregional bekannt ist, fragen KMU regelmäßig hinsichtlich einer Unterstützung an. Das IPH wird auf Anfrage sowohl das Planungstool als auch die projektbezogene Unterstützung bei der Potentialanalyse anbieten. Das Planungstool wird zudem auf der Projekthomepage zum barrierefreien Download zur Verfügung gestellt.

## 10. Durchführende Forschungsstelle

Das IPH – Institut für Integrierte Produktion Hannover gGmbH ist eine gemeinnützige Forschungseinrichtung, die eng mit der Universität Hannover kooperiert. Die Gesellschafter des IPH, Prof. Behrens, Prof. Overmeyer und Prof. Nyhuis, sind gleichermaßen Inhaber produktionstechnischer Lehrstühle an der Universität Hannover. Die Gliederung des IPH in die drei Abteilungen „Prozesstechnik“, „Produktionsautomatisierung“ und „Logistik“ spiegelt die Ausrichtung dieser Lehrstühle wider.

Während die universitären Schwesterinstitute des IPH hauptsächlich den Bereich der Grundlagenforschung abdecken, widmet sich das IPH hauptsächlich der anwendungsorientierten Forschung und Entwicklung. Das IPH wurde 1988 mit Unterstützung des niedersächsischen Wirtschaftsministeriums gegründet und ist besonders der technologischen Förderung mittelständischer Industriebetriebe verpflichtet. Der Technologietransfer von der Universität in die Industrie erfolgt dabei hauptsächlich über gemeinsam mit der Industrie durchgeführte, öffentlich geförderte Verbundforschungsprojekte sowie über Fortbildungsseminare und Arbeitskreise für spezielle Zielgruppen aus Industrie und Handel. Darüber hinaus stellt das IPH laufend in einer Vielzahl ausschließlich industriefinanzierter Beratungsprojekte seine Praxisorientierung und Wettbewerbsfähigkeit unter Beweis.

## **Leiter der Forschungsstelle**

### **IPH – Institut für Integrierte Produktion Hannover gGmbH**

Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Nyhuis

Geschäftsführender Gesellschafter des IPH – Institut für Integrierte Produktion Hannover gemeinnützige GmbH, Hollerithallee 6, 30419 Hannover, Tel.: 0511/27976-119

Prof. Dr.-Ing. Ludger Overmeyer

Geschäftsführender Gesellschafter des IPH – Institut für Integrierte Produktion Hannover gemeinnützige GmbH, Hollerithallee 6, 30419 Hannover, Tel.: 0511/27976-119

Prof. Dr.-Ing. Bernd-Arno Behrens

Geschäftsführender Gesellschafter des IPH – Institut für Integrierte Produktion Hannover gemeinnützige GmbH, Hollerithallee 6, 30419 Hannover, Tel.: 0511/27976-119

Dr.-Ing. Malte Stonis

Koordinierender Geschäftsführer des IPH – Institut für Integrierte Produktion Hannover gemeinnützige GmbH, Hollerithallee 6, 30419 Hannover, Tel.: 0511/27976-119

### **Projektleiter**

M. Sc. Paul Aurich

Wissenschaftlicher Mitarbeiter der Abteilung Logistik des IPH – Institut für Integrierte Produktion Hannover gemeinnützige GmbH

## **11. Förderhinweis**

Das IGF-Vorhaben 21141 N der Bundesvereinigung Logistik (BVL) e. V. wird über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Für die Förderung sei an dieser Stelle gedankt.

## Literaturverzeichnis

- [Arn19] Arnold, D.; Furmans, K.: Materialfluss in Logistiksystemen. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2019.
- [Aur20] Aurich, P.: Schlussbericht: Entwicklung einer Methode zur quantitativen, mehrdimensionalen Fabriklayoutplanung mittels mathematischer Modellierung von fabrikplanungsrelevanten Eigenschaften, Hannover, 2020.
- [Bis15] Bischoff, J.; Taphorn, C.; Wolter, D.; Braun, N.; Fellbaum, M.; Goloverov, A.; Ludwig, S.; Hegmans, T.; Prasse, C.; Henke, M.; Hompel, M. ten; Döbbler, F.; Fuss, E.; Braun, S.; Guth, M.; Kaspers, M.; Scheffler, D.: „Erschließen der Potenziale der Anwendung von Industrie 4.0‘ im Mittelstand“, Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi). <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/erschliessen-der-potenziale-der-anwendung-von-industrie-4-0-im-mittelstand.html>.
- [Bur14] Burke, E.K.; Kendall, G. (Hrsg.): Search methodologies, Introductory tutorials in optimization and decision support techniques. 2. Aufl., Springer, New York, 2014.
- [cel20] cellumation GmbH: celluveyor. <https://cellumation.com/de/celluveyor/>.
- [Dal92] Dallery, Y.; Gershwin, S. B.: Manufacturing flow line systems: a review of models and analytical results. In: Queueing Systems, 12. Jg. (1992), H. 1-2, S. 3-94.
- [Dom15] Domschke, W.; Drexl, A.; Klein, R. et al.: Einführung in Operations Research. 9. Aufl., Springer, Berlin, Heidelberg, 2015.
- [Dri07] Drira, A.; Pierreval, H.; Hajri-Gabouj, S.: Facility layout problems: A survey. In: Annual Reviews in Control, 31. Jg. (2007), H. 2, S. 255-267.
- [fle20] flexlog GmbH: Flexförderer. <https://www.flexlog.de/de/flexfoerderer/>.
- [Gao19] Gao, S.; Rubrico, J. I. U.; Higashi, T. et al.: Efficient Throughput Analysis of Production Lines Based on Modular Queues. In: IEEE Access, 7. Jg. (2019), S. 95314-95326.
- [Gao21] Gao, S.; Kobayashi, T.; Tajiri, A. et al.: Throughput analysis of conveyor systems involving multiple materials based on capability decomposition. In: Computers in Industry, 132. Jg. (2021), S. 103526.
- [Gen10] Gendreau, M.; Potvin, J.-Y. (Hrsg.): Handbook of Metaheuristics. Springer, Boston, MA, USA, 2010.
- [Gon15] Gonçalves, J. F.; Resende, M. G.: A biased random-key genetic algorithm for the unequal area facility layout problem. In: European Journal of Operational Research, 246. Jg. (2015), H. 1, S. 86-107.
- [Hol75] Holland, J. H.: Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence. MIT press, Cambridge, London, 1975.
- [Hos18] Hosseini-Nasab, H.; Fereidouni, S.; Fatemi Ghomi, S. M. T. et al.: Classification of facility layout problems, A review study. In: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 94. Jg. (2018), H. 3, S. 957-977.

- [Int22] Interroll (Switzerland) AG: RM 8731 Transfer. <https://www.interroll.com/de/produkte-loesungen/produkt/rm-8731-transfer/>.
- [IWL16] IWL AG: Intralogistik-Studie 2016, Bedürfnisse der Intralogistik. <https://archive.org/details/Intralogistikstudie2016IWL>.
- [Krü15] Krühn, T.: Dezentrale, verteilte Steuerung flächiger Fördersysteme für den innerbetrieblichen Materialfluss. PZH-Verl. TEWISS - Technik und Wissen GmbH, Garbsen, 2015.
- [Krü16] Krühn, T.; Sohrt, S.; Overmeyer, L.: Mechanical feasibility and decentralized control algorithms of small-scale, multi-directional transport modules. In: Logistics Research, 9. Jg. (2016), H. 1.
- [Li06] Li, J.; Blumenfeld, D. E.; Alden, J. M.: Comparisons of two-machine line models in throughput analysis. In: International Journal of Production Research, 44. Jg. (2006), H. 7, S. 1375-1398.
- [Lit08] Little, J. D. C.; Graves, S. C.: Little's Law. In: Chhajed, D.; Lowe, T. J. (Hrsg.): Building Intuition: Insights From Basic Operations Management Models and Principles, Springer US, Boston, MA2008, S. 81-100.
- [May09] Mayer, S. H.: Development of a completely decentralized control system for modular continuous conveyors. KIT Scientific Publishing, 2009.
- [Ove17] Overmeyer, L.; Stichweh, H.: Vernetzte, kognitive Produktionssysteme. PZH Verlag Wissenschaftlicher Verlag der TEWISS-Technik und Wissen GmbH, Garbsen, 2017.
- [Sch00] Schmidt, L. C.; Jackman, J.: Modeling recirculating conveyors with blocking. In: European Journal of Operational Research, 124. Jg. (2000), H. 2, S. 422-436.
- [Sch18] Schrüfer, M.: Lean Logistik - der Weg zu einer zukunftsfähigen Logistik. <https://info.servus.info/lean-logistik-der-weg-zur-zukunftsf%C3%A4higen-intralogistik>, 15.03.2021.
- [Sei16] Seibold, Z.: Logical Time for Decentralized Control of Material Handling Systems. KIT Scientific Publishing, 2016.
- [Shc19] Shchekutin, N.: Layout optimization for cognitive material flow systems. TEWISS Verlag, Garbsen, 2019.
- [Sin06] Singh, S. P.; Sharma, R. R. K.: A review of different approaches to the facility layout problems. In: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 30. Jg. (2006), H. 5-6, S. 425-433.
- [Soh20] Sohrt, S.; Overmeyer, L.: Decentralized Routing Algorithm with Physical Time Windows for Modular Conveyors. Bundesvereinigung Logistik (BVL) e.V. vol. 13, (2020), no. 8.
- [Soh21] Sohrt, S.: Routing in dezentral gesteuerten, modularen Fördersystemen. Garbsen TEWISS Verlag, 2021.
- [Uri15] Uriarte, C.; Thamer, H.: Celluveyor: Hochflexible Fördertechnik für die Intralogistik 4.0 (Abschlussbericht). 2015.

- [Uri19] Uriarte, C.; Asphandiar, A.; Thamer, H. et al.: Control strategies for small-scaled conveyor modules enabling highly flexible material flow systems. In: Procedia CIRP, 79. Jg. (2019), S. 433-438.
- [Ven12] Ventz, K.; Hachicha, M. B.; Radosavac, M. et al.: Aufbau hochfunktionaler Intralogistik-Knoten mittels kleinskaliger Module als Cognitive Conveyor. In: Logistics Journal Proceedings,(2012),
- [Ven16] Ventz, K.-U.: Beitrag zur innovativen Gestaltung von Intralogistik durch Kopplung kleinskaliger Systeme. 2016.