

Simulation in Produktion und Logistik 2023
Bergmann, Feldkamp, Souren und Straßburger (Hrsg.)
Universitätsverlag Ilmenau, Ilmenau 2023
DOI (Tagungsband): 10.22032/dbt.57476

Simulationsmodell für FTS in Produktionsumgebungen unter Berücksichtigung des Facility Layout Problems

Simulation Model for AGVs in Production Environments Considering the Facility Layout Problem

Lea Schmitz, Jonas Stenzel, Dept. Cognitive Robotics, Fraunhofer IML Dortmund,
Dortmund (Germany), lea.schmitz@iml.fraunhofer.de,
jonas.stenzel@iml.fraunhofer.de

Abstract: In flexible manufacturing systems, an automated guided vehicle (AGV) is often used for material transport. To simulate this transport system, a production environment with aisles and transfer points is required. The arrangement of individual areas within a production environment can be done by solving the Facility Layout Problem (FLP). However, the previous solution methods only consider individual aspects and there are hardly any solution methods that consider the entire production system with regard to the material transport system. Due to this, a FLP solving method that also considers aspects regarding the material handling system is useful so that the created production environments can be simulated and/or used in practice. Therefore, both topics - FLP and AGV - should be considered together.

1 Motivation und Problemstellung

Bei Flexiblen Fertigungssystemen (FFS) — ein bestimmter Typ von mehrstufigen Produktionssystemen (Hehenberger 2011) — wird häufig ein Fahrerloses Transportsystem (FTS) für den Materialtransport verwendet (Rajotia et al. 1998, Arifin & Egbelu 2000). Eine Rolle bei der Optimierung von FTS spielt die Anordnung von verschiedenen Organisationseinheiten (OE), welche bspw. Maschinen, Lagerplätze, Arbeitsplätze, Fertigungsplätze (Scholz 2010, Klausnitzer & Lasch 2016), Übergabe- und Parkplätze für Fahrerlose Transportfahrzeuge (FTF) sowie notwendige FTF-Fahrflächen innerhalb einer Produktionsumgebung darstellen können. Das Problem der Anordnung dieser OE ist als Facility Layout Problem (FLP) bekannt und zielt darauf ab, dass die Kosten des Materialtransportes der resultierenden Produktionsumgebung möglichst gering sind (Scholz 2010, Klausnitzer & Lasch 2016, Klausnitzer 2019).

Ein Problem bei den bisherigen Lösungsmethoden des FLP besteht darin, dass häufig Aspekte für den Einsatz eines realen FTS nicht berücksichtigt werden. Dazu gehören die Fahrflächen der Fahrerlosen Transportfahrzeuge (FTF), die Anbindung der Übergabepunkte an die FTF-Fahrfläche und die Betrachtung des Routings, Dispatching und Scheduling für die FTF (Vivaldini et al. 2015) auf Basis der generierten Produktionsumgebung.

1.1 Bezug zur Simulation

In diesem Beitrag wird ein Simulationsmodell entwickelt, welches einerseits die Anforderungen eines FTS bei der Layouterstellung der Produktionsumgebung bzw. beim FLP berücksichtigt. Andererseits wird die Dynamik des FTS bereits bei der Layouterstellung durch eine abstrakte Simulation des FTF-Routings berücksichtigt. Dabei wird beispielsweise überprüft, ob das FTS in der Lage ist alle notwendigen Transportaufträge innerhalb eines bestimmten Zeitraums abzuarbeiten.

2 Wissenschaftliche Abgrenzung

Im Folgenden werden die Grundlagen dargestellt. Dazu wird zunächst das FLP und anschließend das FTS sowie alle damit verbundenen Aspekte erläutert.

2.1 FLP

Das Facility Layout Problem (FLP) positioniert eine festgelegte Anzahl von OE innerhalb eines Standortträgers, sodass die Kosten des Materialtransportes minimiert werden (Scholz 2010, Klausnitzer 2019, Klausnitzer & Lasch 2016). Das FLP gehört zu den NP-harten, kombinatorischen Problemen (Klausnitzer & Lasch 2016) und wird bereits seit Jahrzehnten erforscht (Klausnitzer & Lasch 2016). Aufgrund dessen gibt es eine Vielzahl von unterschiedlichen Lösungsverfahren mit verschiedenen Ansätzen. Viele dieser Ansätze berücksichtigen nur ausgewählte Aspekte, wie bspw. die Ermittlung der Übergabepunkte. Die Schritte eins bis einschließlich drei aus Abbildung 2 sind aus der Literatur bekannt. Scholz (2010) hat einen FLP-Ansatz zur Anordnung von OE basierend auf einer speziellen Datenstruktur – Slicing Trees (ST) – entwickelt. Diese bietet die Möglichkeit mit einem einfachen Verfahren eine Gangstruktur im Layout einzufügen (siehe Kap. 4). Friedrich et al. (2018) haben das FLP-Lösungsverfahren um die Ermittlung der Übergabepunkte erweitert. Dabei konnte ein Übergabepunkt innerhalb einer der vier Ecken einer OE positioniert werden. Dies ist für die spätere Anbindung an die Transportgänge — das Einfügen der Übergabeflächen — sinnvoll. Klausnitzer und Lasch (2016) haben Transportgänge abhängig von den Transportbeziehungen und -intensitäten zwischen den OE innerhalb der Produktionsumgebung für den Materialtransport eingefügt. Allerdings werden bei diesem Verfahren die Aspekte des FTF-Routings nicht berücksichtigt bspw. können Lösungen auftreten bei denen nicht jede OE von jeder anderen OE aus erreicht werden kann (Klausnitzer und Lasch 2016). Klausnitzer (2019) hat dieses Verfahren zum Einfügen von Transportgängen weiterentwickelt und fügt Gänge ein, wo die OE noch über keine Anbindung an Transportgänge verfügen.

2.1.1 Bewertung eines Layouts

Zur Bewertung eines Layouts werden die Materialtransportkosten C ermittelt (Scholz 2010, Klausnitzer & Lasch 2016, Klausnitzer 2019):

$$C = \sum_{i=1, j=1}^M (t_{ij} \cdot d_{ij})$$

Diese Summe definiert sich durch die Distanz d_{ij} von OE i nach OE j gewichtet mit der Transportintensität t_{ij} . Die Transportintensität ist der Transportmatrix zu entnehmen und entspricht den Materialieneinheiten, welche zwischen dem OE-Paar transportiert wird. M ist die Anzahl der zu platzierenden OE im Layout.

Die Distanz d_{ij} wird je nach FLP-Ansatz unterschiedlich berechnet. Der FLP-Ansätze von Scholz (2010), Castillo et al. (2005), Castillo & Westerlund (2005) und Wong et al. (2010) berechnen die Distanz zwischen den Schwerpunkten einer OE. Im Hinblick auf FTF ist diese Annahme des Fahrweges zwischen den Schwerpunkten realitätsfern. Bei dem Verfahren nach Friedrich et al. (2016) wird angenommen, dass die FTF entlang der Grenzen der OE fahren. Es werden Übergabepunkte ermittelt, welche am Rand der OE liegen & zwischen diesen wird entlang der Grenzen die Distanz ermittelt. Der physische Raum zum Befahren fehlt. In den Ansatz von Klausnitzer (2019) wird angenommen, dass sich die Fahrwege immer in der Mitte des Ganges befinden. Die pfadbasierte Distanz wird zwischen den Übergabepunkten und unter Berücksichtigung der Gänge berechnet.

2.2 FTS

FTS sind heute fast in allen Branchen und Produktionsbereichen zu finden und somit ein wichtiger Bestandteil der Intralogistik (Verein Deutscher Ingenieure). Nach der VDI 2510 werden FTS als innerbetriebliche, flurgebundene Systeme mit automatisch gesteuerten Fahrzeugen zur Abwicklung des Materialtransportes bezeichnet (Verein Deutscher Ingenieure). Zur Koordinierung der FTF benötigt das FTS das Wissen über mögliche Fahrwege der FTF. Eine Möglichkeit ist diese in Form von topologischen Graphen zu erstellen (Digani et al. 2014).

2.2.1 Topologische Graphen

Topologische Graphen sind planare Graphen mit einer endlichen Menge von Knoten und Kanten (Archdeacon 1996). Jede Kante verbindet zwei Knoten miteinander. Im Zusammenhang mit FTS repräsentieren die Kanten des topologischen Graphen Pfade bzw. Straßen für die FTF. Kreuzungen und wichtige Haltepunkte, bspw. Stationen zum Be- und Entladen an den OE, werden durch Graphknoten dargestellt.

Zur Erstellung des topologischen Graphen wird ein beim Fraunhofer IML weiterentwickeltes Verfahren, genannt Roadmap Graph Creator (RGC), auf Basis von Digani et al. (2014) verwendet. Im Rahmen der Forschung am Fraunhofer IML wurden weitere Parameter zur Erstellung des topologischen Graphen hinzugefügt. Beispielsweise ist es nun möglich auch innerhalb von Korridoren ein Raster aus Straßen erstellen zu lassen (Stenzel & Schmitz 2022). Der RGC kann aufgrund des Parameters FTF-Größe für alle möglichen FTF-Typen verwendet werden. Ein weiterer Vorteil dieses Verfahrens ist die Erstellung von redundanten Graphkanten. Ist ausreichend Platz vorhanden, können Pfade nebeneinandergelegt und miteinander verbunden werden und so mehrere FTF auf parallelen Fahrspuren gleichzeitig fahren.

Dies kann den Durchsatz des FTS erhöhen. Aufgrund der genannten Vorteile wird das RGC-Verfahren zur Erstellung von topologischen Graphen angewandt. Zum einen wird der topologische Graph verwendet, um die Distanz zwischen den Übergabepunkten zu berechnen (pfadbasierte Distanzmetrik) und zum anderen benötigt das Simulationsmodell zum Routing den topologischen Graphen zur Ermittlung der Pfade für die FTF zur Ausführung der Transportaufträge.

2.2.2 CCBS-Routing

Zur Berücksichtigung des dynamischen Verhaltens der FTF in der erstellten Produktionsumgebung wird ein abstraktes Simulationsmodell erstellt. Dazu wird Continuous-time conflict-based search (CCBS) verwendet. CCBS ist ein Algorithmus zum Suchen von Pfaden für mehrere FTF in einer festgelegten Umgebung, sodass jedes FTF sein Ziel erreicht, ohne dabei Konflikte mit anderen FTF auszulösen (Andreychuk et al. 2021, Andreychuk et al. 2019).

Dabei wird eine Menge von Transportaufträgen festgelegt, indem Start und Ziel durch Knoten des topologischen Graphen definiert sind. Für jeden Transportauftrag wird genau ein FTF angenommen, welches im definierten Startknoten des topologischen Graphen startet. Die Pfade der FTF werden über den topologischen Graphen gewählt. Als Ergebnis gibt CCBS bestimmte Kennwerte für das Routing der übergebenen Menge von Transportaufträgen zurück, u.a. die Zeitspanne. Die Zeitspanne entspricht der Zeit, welche das letzte FTF benötigt, bis es sein Ziel erreicht hat. CCBS plant stapelweise, d.h. bevor nicht alle FTF ihr Ziel erreicht haben, können keine neuen Transportaufträge an FTF vergeben werden (Andreychuk et al. 2021, Andreychuk et al. 2019).

3 Anforderungen und Bewertungskriterien eines Layouts hinsichtlich der Anwendung in einem FTS

Bevor eine Lösung entwickelt werden kann, müssen die Anforderungen hinsichtlich des Layouts und des topologischen Graphen für den Einsatz innerhalb eines FTS festgelegt werden. Auf Basis dieser Kriterien wird das FLP-Lösungsverfahren weiterentwickelt, sodass ein auf die Anforderungen des FTF gut abgestimmtes Produktionsumgebungsmodell erzeugt werden kann. Dieses Modell kann zur Simulation verwendet und/oder in der Praxis bei Bedarf direkt umgesetzt werden.

3.1 Anforderungen an das Layout

Damit das auf Basis des FLP erstellte Layout sich für den Einsatz innerhalb eines FTS eignet, sollten Transportgänge für die FTF zwischen den einzelnen OE definiert sein (Klausnitzer & Lasch 2016, Klausnitzer 2019). Ein weiterer Aspekt besteht in der Annahme, dass nur ein Übergabepunkt für jede OE definiert wird. Im Hinblick auf die Anwendung im FTS kann dies zu einem Problem führen. Zum Beispiel fahren mehrere FTF die gleiche OE an und kommen zum gleichen Zeitpunkt an, muss zunächst geklärt werden, welches FTF als erstes auf den Übergabepunkt zum Be- bzw. Entladen der Materialien fahren darf. Dies bedeutet für die anderen FTF zu warten. Dabei könnten die wartenden FTF andere FTF behindern, welche dabei sind andere Transportaufträge zu erfüllen. Dies führt zu Stau und Verzögerung im gesamten FFS. Deshalb kann es notwendig sein, wenn mehrere Übergabepunkte identifiziert werden

können. In unserem Ansatz verwenden wir dafür eine Übergabefläche (siehe später Kap. 4.4).

3.2 Anforderungen an den topologischen Graphen

Auf Basis der Gangstruktur soll der topologische Graph und damit die Wegpunkte für die FTF generiert werden. Der topologische Graph muss zwei Anforderungen für den Einsatz innerhalb eines FTS erfüllen. Zunächst muss sichergestellt sein, dass von jedem Graphknoten aus kann jeder andere Graphknoten über die Kanten erreicht werden kann. Diese Eigenschaft lässt sich über den Graphzusammenhang testen, beträgt dieser eins ist die Anforderung erfüllt (Diestel 2017). Weiterhin ist zu überprüfen, ob alle OE auch über Graphknoten und –kanten einen Anschluss an die Gangstruktur haben. Dazu wird geprüft, ob sich mindestens ein Graphknoten innerhalb der Übergabefläche befindet.

4 FLP-Solver

Aufgrund der uns bekannten FLP-Lösungsverfahren, welche die Anforderungen im Hinblick auf die Anwendung in einem FTS nicht berücksichtigen, haben wir einen eigenen Ansatz entwickelt. Dadurch sind die erstellten Produktionsumgebungen in der Praxis verwendbar. Schritte eins bis einschließlich drei (siehe Abb. 1) sind aus der Literatur bekannt. Unsere Weiterentwicklung des FLP-Lösungsverfahrens beinhaltet die weiteren Schritte vier bis einschließlich sechs aus Abbildung 1, welche Anforderungen hinsichtlich des FTS berücksichtigen. Dazu wird das FLP-Lösungsverfahren von Scholz (2010) erweitert. Im Folgenden werden die einzelnen Schritte erläutert.

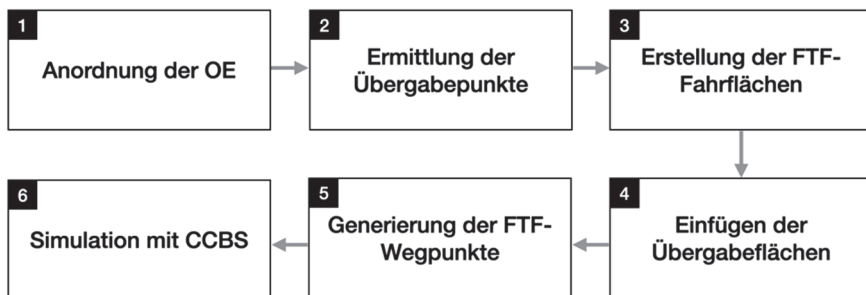


Abbildung 1: Darstellung der Schritte zur Generierung eines FLP-Layouts zur Erstellung einer Produktionsumgebung. Schritte eins bis einschließlich drei sind in der Literatur zu finden. Schritte vier bis einschließlich sechs sollen im Hinblick auf die Aspekte eines Materialtransportsystems ebenfalls bei der Erstellung berücksichtigt werden.

4.1 Anordnung der OE & Ermittlung der Übergabepunkte

Zur Lösung des FLP werden allgemein eine Reihe von Eingangsdaten benötigt (Scholz 2010). Dazu gehören die Abmessungen des Standortträgers, die Anzahl der zu platzierenden OE, die benötigte Fläche für jede OE, die Abmessungen jeder OE

und die Transportmatrix. Die Transportmatrix gibt an, wie viel Material zwischen den einzelnen OE transportiert werden muss (Scholz 2010). Auf Basis dieser benötigten Eingangsdaten werden zufällige STs generiert, um die endgültigen Positionen der OE und damit die Anordnung der OE zu erhalten (siehe Abb. 2a).

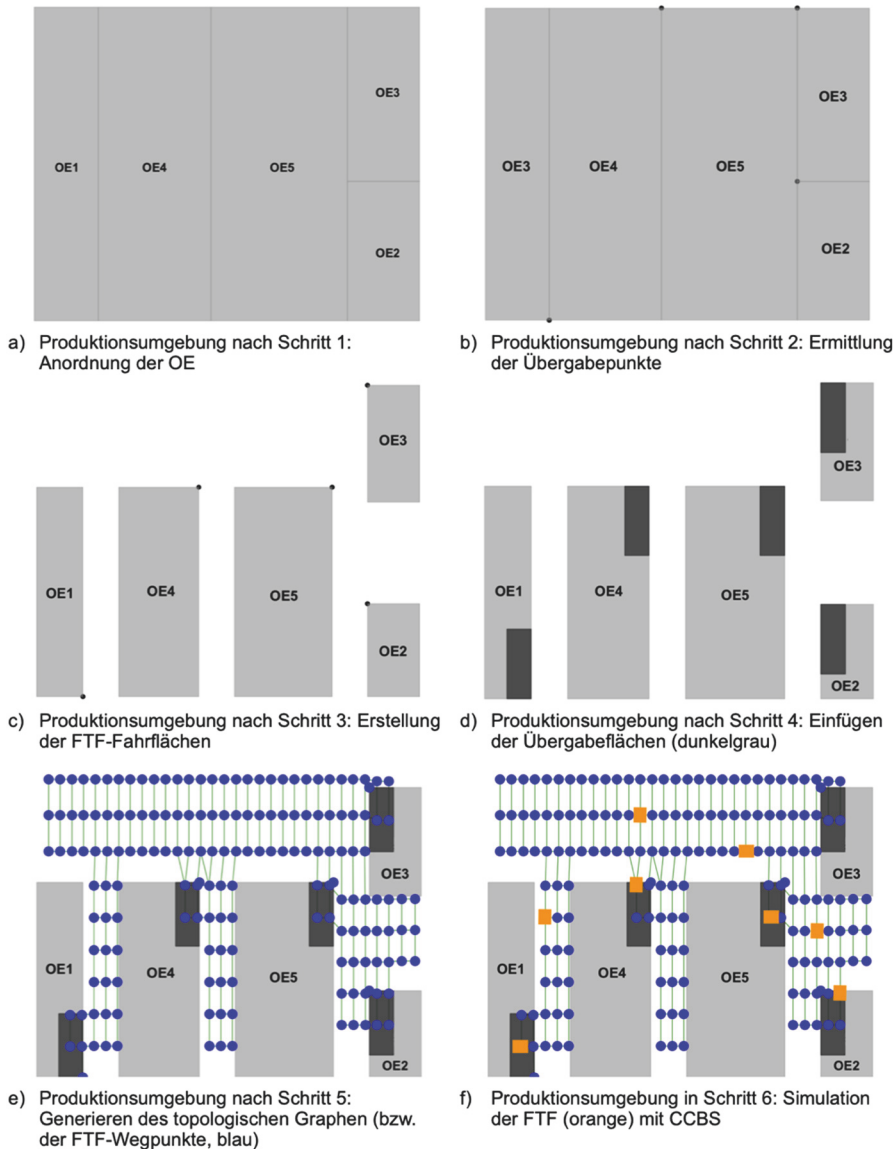


Abbildung 2: Darstellung der generierten Produktionsumgebung nach den Schritten aus Abbildung 1.

Zur Ermittlung der Übergabepunkte (= Station zum Be- und Entladen der FTF an den OE) wird das Verfahren von Friedrich et al. (2018) angewendet. Zunächst werden

Kandidaten für Übergabepunkte auf Basis der dominanten Region ermittelt. Zur Identifizierung der dominanten Region wird jede Ecke der OE als Graphknoten einem Graphen hinzugefügt. Die Grenzen der OE werden durch Kanten dargestellt. Die dominante Region besteht aus einer oder mehreren, aneinander liegende OE, welche mindestens für jede OE eine Ecke bzw. einen Graphknoten aufweisen. Diese Graphknoten in der dominanten Region stellen die Kandidaten für Übergabepunkte dar. Die Einschränkung von Friedrich et al. (2018), dass eine dominante Region rechteckig sein muss, haben wir aufgelöst. In unserem Ansatz kann die dominante Region auch ein Polygon sein. Nachdem die Kandidaten für Übergabepunkte ermittelt sind, werden die OE-Paare entsprechend ihrer Transportintensität absteigend sortiert. Für jedes OE-Paar werden die beiden Übergabepunkte ausgewählt (siehe Abb. 2b), welche die geringste Distanz zueinander aufweisen (Friedrich et al. 2018).

4.2 Erstellung der FTF-Fahrflächen

Zur Erstellung der Fahrflächen wird die Struktur der STs ausgenutzt. Die Idee stammt von Scholz (2010) und wurde für unsere Zwecke angepasst. Es wird jeder Schnittpunkt im ST betrachtet. Das rechte Kind des Schnittpunkts und alle Knoten davon werden, abhängig von der Schnitttrichtung entlang der x- oder y-Achse in positiver Richtung um eine vordefinierte Gangbreite verschoben. Dadurch entstehen die Fahrflächen für die FTF (siehe Abb. 2c).

4.3 Einfügen der Übergabeflächen

Auf Basis der ermittelten Übergabepunkte aus Schritt 2 (siehe Abb. 1) werden Übergabeflächen mit einer vordefinierten Größe eingefügt. Alle Übergabeflächen sind gleich groß (siehe Abb. 2d). Die Idee ist diese Übergabeflächen ebenfalls als Fahrflächen für die FTF zu behandeln. Dadurch entstehen automatisch im Zusammenhang mit dem nächsten Schritt – Generierung der FTF-Wegpunkte – mehrere Übergabepunkte pro OE, da alle Graphknoten des topologischen Graphen innerhalb der Übergabefläche als Übergabepunkt identifiziert werden können.

4.4 Generierung der FTF-Wegpunkte

Die Generierung des topologischen Graphen erfolgt über die Freifläche, bestehend aus den Fahr- und Übergabeflächen anhand des RGC-Softwaretools (siehe Abb. 2e). Wichtig ist, dass der Graph die beiden genannten Anforderungen erfüllt, sonst kann das erstellte Layout nicht bewertet werden.

4.5 Simulation mit CCBS-Routing

Zur Bewertung des Layouts wird in unserem Ansatz die CCBS-Zeitspanne verwendet. Damit wird das dynamische Fahrverhalten der FTF und die Parallelität der abzuarbeitenden Transportaufträge im Layout berücksichtigt, welches bei anderen Bewertungskriterien für das FLP-Layout nicht berücksichtigt wird. Dazu muss zunächst eine Menge von Transportaufträgen generiert werden. Anschließend wird unter Berücksichtigung eines Zeitfensters CCBS mit den generierten Transportaufträgen ausgeführt und die Zeitspanne als Kosten für das Layout angenommen:

$$C = M(\pi)$$

Falls CCBS keine Lösung innerhalb des Zeitfensters findet, wird das doppelte der längsten Distanz im Layout zur Bewertung berechnet:

$$C = 2 \cdot \max(d_{ij})$$

5 Evaluierung

Zur Evaluierung haben wir mehrere Dateninstanzen (DI) aus verschiedenen Veröffentlichungen und deren Ergebnisse mit unserem Ansatz verglichen. Dazu haben wir je nach FLP-Ansatz unterschiedlich viele Schritte aus der Literatur zur Generierung eines Layouts (siehe Abb. 1) berücksichtigt. Die Auswertungen wurden auf einer AWS-Server Instanz EC2 C5A.XLarge (Amazon Web Services 2023) durchgeführt. Tabelle 1 zeigt die vier verschiedenen Versionen.

Tabelle 2: Übersicht der Anwendungen zur Evaluierung.

Literatur	Distanz-Metrik	Berücksichtigte Schritte zur Generierung eines Layouts (Abb. 1)
Scholz (2010), Castillo et al. (2005), Castillo & Westerlund (2005), Wong et al. (2010)	Schwerpunkt-Distanz	1
Friedrich et al. (2016)	Konturbasierte Distanz	1 und 2
Klausnitzer (2019)	Pfadbasierte Distanz	1, 2 und 3
Unser Ansatz	Pfadbasierte Distanz über topo. Graphen	Alle Schritte aus Abbildung 1

Die vorgegebenen minimal und maximal Seitenlängen der einzelnen OE konnten aufgrund der ausgewählten Schnitte im ST nicht immer eingehalten werden. Aus diesem Grund werden die Begrenzungen für die Seitenlängen in der Evaluierung nicht berücksichtigt. Die Tabellen 2-5 vergleichen unsere Ergebnisse mit den besten Ergebnissen aus der Literatur sofern dies möglich ist. Der Zahlenwert in der Spalte „Bestes Ergebnis“ stellt die Materialtransportkosten C für die jeweilige DI dar. Der Wert „Anz. STs“ entspricht der Anzahl der gefundenen, gültigen STs für den gelisteten Durchlauf des FLP-Solvers.

5.1 FLP-Solver: reine Anordnung (V1)

Tabelle 2 zeigt, dass die Ergebnisse aus der Literatur für das FLP-Verfahren mit Schwerpunkt-Distanz mit Ausnahme der Dateninstanz AB20 durchschnittlich um 7,53% besser sind. Es ist wahrscheinlich, dass mit weiteren Ausführungen für Dateninstanz AB20 ein ähnliches oder besseres Ergebnis erzielt werden könnten.

Tabelle 2: Evaluierungsergebnisse für Anwendung V1 mit Schwerpunkt-Distanz im Vergleich zu FLP-Ansätzen aus der Literatur.

DI	Bestes Ergebnis aus der Literatur	Unser Ansatz			Abweichung
		Bestes Ergebnis	Anz. STs	Laufzeit [HH:MM:SS]	
OE7	131,57 (Castillo et al. 2005)	108,78	5	00:00:06	+17,32%
OE8	242,73 (Castillo & Westerlund 2005)	220,94	7	00:00:16	+8,98%
OE9	235,84 (Castillo et al. 2005)	207,51	9	00:00:25	+12,01%
VC10	19994,10 (Wong et al. 2010)	19183,98	6	00:02:58	+4,05%
BA12	8021 (Scholz 2010)	8071,28	34	00:02:21	-0,63%
BA14	4628,84 (Scholz 2010)	4469,25	19	00:04:27	+3,45%
AB20	5073,82 (Wong et al. 2010)	67725,68	1	00:10:46	-92,51%

Tabelle 3: Evaluierungsergebnisse für Anwendung V2 mit konturbasierter Distanz im Vergleich zu den Ergebnissen von Friedrich et al. (2016).

DI	Ergebnis Friedrich et al. (2016)	Unser Ansatz			Abweichung
	Bestes Ergebnis	Bestes Ergebnis	Anz. STs	Laufzeit [HH:MM:SS]	
OE7	21,64	36,85	7	00:00:12	-41,28%
OE8	52,09	66,64	6	00:00:25	-21,83%
OE9	53,29	76,32	7	00:00:32	-30,18%
VC10	3097,91	18134,46	6	00:04:46	-82,92%
BA12	3089,91	4747,06	27	00:08:25	-34,91%
BA14	2188,33	3318,85	21	00:15:19	-34,06%
AB20	1185,99	89280,45	2	04:02:16	-98,67%

5.2 FLP-Solver mit Übergabepunkten (V2)

Die Ergebnisse von Friedrich et al. (2016) konnten nicht erreicht werden (siehe Tab. 3). Ein Grund dafür ist die Einhaltung der Abmessungen des Layouts. Während Friedrich et al. (2016) Layouts mit größeren Abmessungen erlauben, lässt unser Ansatz nur Layouts zu, welche innerhalb der vorgegebenen Abmessungen liegen. Dies ist praxisnaher, da der notwendige Platz, bspw. eine Produktionshalle, begrenzt

ist. Die Halle im Nachgang zu vergrößern ist realitätsfern. Wie bereits zuvor besteht ebenfalls die Chance mit weiteren Ausführungen bessere Ergebnisse zu erzielen.

5.3 FLP-Solver mit Gangstruktur (V3)

Die Vergleichbarkeit zwischen Klausnitzers (2019) und unserem Ansatz ist aufgrund einiger Unterschiede, wie bspw. dem Verfahren zum Einfügen von Fahrwegen und der individuellen Parameter, welche das Ergebnis zusätzlich beeinflussen (Scholz 2010) schwierig. Im Vergleich mit den vier veröffentlichten Werten von Klausnitzer (2019) schneidet Dateninstanz BA14 am Besten ab. Auch hier besteht die Chance mit weiteren Ausführungen bessere Ergebnisse zu erzielen.

Tabelle 4: Evaluierungsergebnisse für Anwendung V3 mit pfadbasierter Distanz auf Basis der Gänge im Layout verglichen mit den Ergebnissen von Klausnitzer (2019).

DI	Ergebnis Klausnitzer (2019)	Unser Ansatz			Abweichung
		Bestes Ergebnis	Anz. STs	Laufzeit [HH:MM:SS]	
VC10	7116,14	27315,12	15	04:43:27	-73,95%
BA12	5561,12	8105,33	1	00:15:28	-31,39%
BA14	3784,47	3964,14	1	00:20:27	-4,53%
AB20	1529,63	89516,26	3	08:26:22	-98,29%

5.4 FLP-Solver mit Übergabeflächen & CCBS-Routing (V4)

Tabelle 5 stellt die Ergebnisse für unsere eigene Metrik dar, welche das CCBS-Routing und damit die Parallelität im FTS bzw. FFS berücksichtigt. Ebenso wie zuvor besteht die Chance auf bessere Ergebnisse mit weiteren Durchführungen, da mit jeder Ausführung zufällige Dateninstanz generiert werden auf dessen Basis optimiert wird (Scholz 2010).

Tabelle 5: Evaluierungsergebnisse für unseren Ansatz mit pfadbasierter Distanz auf Basis der topologischen Graphen und unter Berücksichtigung des CCBS-Routings.

DI	bestes Ergebnis unser Ansatz	Anz. STs	Laufzeit [HH:MM:SS]
VC10	59,31	2	04:21:18
BA12	14,85	1	00:34:03
BA14	15,15	1	00:41:37
AB20	62,15	1	08:17:12

Auffällig ist, dass die Anzahl der gefundenen, gültigen Layouts (Anz. STs in den Tabellen) sich bei allen vier Versionen ebenfalls stark unterscheidet. Diese hat einen großen Einfluss auf das Ergebnis, da dies zeigt, wie viele Layouts aus dem möglichen Lösungsraum betrachtet wurden. Weiterhin spielen die individuellen Parameter (z.B. Anzahl der zufällig generierten STs und Größe des betrachteten Suchraums) bei der

Suche nach dem lokal, besten Layout (Scholz 2010) eine Rolle. Diese wirken sich auf die Ergebnisse und auf die Laufzeit aus. Je länger die Laufzeit, desto mehr Layouts können betrachtet werden und desto größer die Wahrscheinlichkeit für ein gutes Ergebnis.

6 Abschlussbetrachtung

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass in dieser Veröffentlichung ein praxisnaher FLP-Ansatz zur Generierung von Layouts für Produktionsumgebungen unter Berücksichtigung der Anforderungen für den Einsatz in einem FTS entwickelt und vorgestellt wurde. Jedes resultierende Layout unseres Ansatzes kann in einem FTS verwendet werden.

Für zukünftige Forschungsarbeiten sollten zum einen eine Optimierung hinsichtlich der Laufzeit durchgeführt werden, sodass mehr Layouts in kürzerer Zeit berechnet werden können. Damit steigt die Wahrscheinlichkeit für ein gutes Ergebnis. Darüber hinaus sollten einige Aspekte weiter optimiert werden, wie zum Beispiel die Frage, ob statt gleich große Übergabeflächen eher Übergabeflächen angepasst an die Transportintensitäten der OE gewählt werden sollten. So könnten OEs mit hohen Transportintensitäten von mehr FTF gleichzeitig angefahren werden. Auch das Verfahren zur Ermittlung der Übergabepunkte und damit die Positionierung der Übergabeflächen kann angepasst werden, da es nach dem Verfahren von Friedrich et al. (2016) möglich ist auch an den äußeren Rändern entlangzufahren (=Grenzen der OE). In der Realität nach Einfügen der Gangstruktur ist dies jedoch zum größten Teil nicht möglich, da dafür zusätzlicher Platz benötigt werden würde. Außerdem kann das Routing selbst ausgetauscht werden, indem beispielsweise ein praxisrelevanteres Anytime-Routing Verfahren verwendet wird. Im Gegensatz zur stapelweisen Planung bei CCBS (Andreychuk et al. 2022, Andreychuk et al. 2021) kann ein Fahrzeug beim Anytime-Routing, bspw. CARP (Mors et al. 2007), direkt einen neuen Transportauftrag erhalten, sobald der vorherige abgeschlossen ist, ohne auf das Abschließen von Transportaufträgen der anderen Fahrzeuge warten zu müssen.

Literatur

- Amazon Web Services, Inc. bzw. Tochtergesellschaften des Unternehmens: Amazon EC2 C5-Instances (2023). url: <https://aws.amazon.com/de/ec2/instance-types/c5/>
- Andreychuk, A.; Yakovlev, K.; Surynek, P.; Atzmon, D.; Stern, R.: Multi-agent pathfinding with continuous time. *Artificial Intelligence*, 305 (2022). S. 103662.
- Andreychuk, A.; Yakovlev, K.; Boyarski, E.; & Stern, R.: Improving continuous-time conflict based search. In: *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence Vol. 35* (2021). S. 11220-11227.
- Arifin, R.; Egbelu, P.J.: Determination of vehicle requirements in automated guided vehicle systems: A statistical approach. In: *Production Planning & Control* 11.3 (2000), S. 258–270.
- Archdeacon, D. Topological graph theory. In: *A survey. Congressus Numerantium* 115.5-54 (1996), S. 18.

- Castillo, I.; Westerlund, J.; Emet, S.; Westerlund, T.: Optimization of block layout design problems with unequal areas: A comparison of MILP and MINLP optimization methods. In: *Computers & Chemical Engineering* 30.1 (2005), S. 54-69.
- Castillo, I.; Westerlund, T.: An ε -accurate model for optimal unequal-area block layout design. In: *Computers & Operations Research*. 32 (2005). S. 429-447.
- Diestel, R.: *Graphentheorie*. Bd. 5. Springer Spektrum, 2017. ISBN: 978-3-662-53633-9. url: <https://www.springer.com/de/book/9783662536339>.
- Digani, V.; Sabbatini, L.; Secchi, C.; Fantuzzi, C.: An automatic approach for the generation of the roadmap for multi-AGV systems in an industrial environment. In: *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems* (2014). 1736-1741. 10.1109/IROS.2014.6942789.
- Friedrich, C.; Klausnitzer, A.; Lasch, R.: Integrated slicing tree approach for solving the facility layout problem with input and output locations based on contour distance. In: *European Journal of Operational Research*, 270(3) (2018). S. 837-851.
- Hehenberger, P.: *Computergestützte Fertigung. Eine kompakte Einführung*. Berlin, Heidelberg: Springer 2011.
- Klausnitzer, A.: A Scatter Search Approach for the Facility Layout Problem with Aisle Design. In: Fortz, B.; Labbé, M. (Hrsg.): *Operations Research Proceedings 2018*. S. 435-441.
- Klausnitzer, A.; Lasch, R.: Extended Model Formulation of the Facility Layout Problem with Aisle Structure. In: Mattfeld, D.; Spengler, T.; Brinkmann, J.; Grunewald, M. (Hrsg.): *Logistics Management. Lecture Notes in Logistics*. Springer, Cham 2016. S. 89-101.
- Mors, A. ter.; Zutt, J., Witteveen, C.: Context-Aware Logistic Routing and Scheduling. In: *ICAPS* (2007), S. 328 – 335.
- Rajotia, S.; Shanker K.; Batra, J.L.: Determination of optimal AGV fleet size for an FMS. In: *International Journal of Production Research* 36.5 (1998), S. 1177-1198.
- Scholz, D.: *Innerbetriebliche Standortplanung. Das Konzept der Slicing Trees bei der Optimierung von Layoutstrukturen*. Wiesbaden: Gabler Verlag 2010.
- Stenzel, J.; Schmitz, L.: Automated Roadmap Graph Creation and MAPF Benchmarking for Large AGV Fleets, 2022 8th International Conference on Automation, Robotics and Applications (ICARA), Prague, Czech Republic, 2022, pp. 146-153, doi: 10.1109/ICARA55094.2022.9738574.
- Verein Deutscher Ingenieure: *VDI 2510, Fahrerlose Transportsysteme (FTS)*. Berlin: Beuth 2005.
- Vivaldini, K. C.; Rocha, L. F.; Becker, M.; Moreira, A. P.: Comprehensive review of the dispatching, scheduling and routing of AGVs. In *CONTROLO'2014 – proceedings of the 11th Portuguese conference on automatic control* (2015). S. 505-514. Springer International Publishing.
- Wong, K.; Komarudin, K.: Solving facility layout problems using Flexible Bay Structure representation and Ant System algorithm. In: *Expert Syst. Appl.*. 37 (2010) S. 5523-5527.