

Schlussbericht

zu IGF-Vorhaben Nr. 19994 N

1. Thema

Automatisierte und integrierte Layout- und Transportsystemplanung unter Berücksichtigung logistischer und wirtschaftlicher Zielgrößen

2. Berichtszeitraum

01.11.2018 – 31.03.2021

3. Forschungsvereinigung

Bundesvereinigung Logistik e.V. – BVL

4. Forschungseinrichtung(en)

IPH - Institut für Integrierte Produktion Hannover gGmbH

Hannover, 15.07.2021

Ort, Datum

Christian Kutzner

C. Kutzner

Name und Unterschrift aller Projektleiterinnen und Projektleiter der
Forschungseinrichtung(en)

Gefördert durch:

Inhalt

1.	Zusammenfassung.....	4
2.	Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung	4
3.	Gegenüberstellung angestrebter Teilziele und erzielter Ergebnisse	5
4.	Erzielte Ergebnisse	7
4.1.	Ausgangsbasis.....	7
4.1.1.	Überblick Transportmittelarten	8
4.1.2.	Identifikation der Einflüsse auf die Layoutgestaltung	8
4.1.3.	Identifikation der Einflüsse von Transportmitteln auf die Layoutgestaltung.....	10
4.1.4.	Morphologischer Kasten zur Auslegung von Transportnetzen.....	12
4.1.5.	Morphologischer Kasten zur Transportmittelauswahl	15
4.2.	Fuzzy-Logik.....	18
4.2.1.	Zugehörigkeitsfunktionen	18
4.2.2.	Regelbasis	20
4.3.	Aufbau und Implementierung des Expertensystems.....	25
4.3.1.	Expertensystems zur Transportmittelauswahl	26
4.3.2.	System zur Layout- und Transportnetzplanung	28
4.3.3.	Softwaredemonstrator Layout- und Transportnetzplanung	34
4.4.	Validierung	35
4.4.1.	Validierung der Layoutplanung.....	35
5.	Ergebnisdokumentation und Veröffentlichung	37
6.	Verwendung der Zuwendung	37
7.	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	38
8.	Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen	38
9.	Veröffentlichungen und Transfermaßnahmen	39
10.	Einschätzung der Realisierbarkeit der geplanten Maßnahmen.....	42
11.	Durchführende Forschungsstelle.....	43
12.	Förderhinweis	44
13.	Anhang	45
13.1.	Anhang 1: Steckbrief Dreiradstapler.....	45
13.2.	Anhang 2: Einflussfaktoren auf die Layoutgestaltung	47
13.3.	Anhang 3: Einflussfaktoren auf die Wegenetzesauslegung.....	50

13.4.	Anhang 4: Regelbasis Eingangparameter Fördereinheit.....	51
13.5.	Anhang 5: Zugehörigkeitsfunktionen Fuzzy-Logik	52
13.6.	Anhang 6: Regelbasis der Zwischenstufe.....	54
13.7.	Anhang 7: Mathematisches Modell zur Layoutplanung.....	59
14.	Literaturverzeichnis	84

1. Zusammenfassung

Durch eine kontinuierlich veranlasste innovative Fabrikplanungstätigkeit und damit einer Anpassung oder Neukonfiguration der Fabrikstrukturen kann die Wettbewerbsfähigkeit von Industrieunternehmen aufrechterhalten und gesteigert werden. Trotz eines ganzheitlichen Fabrikplanungsansatzes erfolgen die Transportmittelauswahl (z. B. Schubmaststapler, Routenzug) und die Planung der Transportnetze (z. B. Wegenetz für fahrerlose Transportsysteme (FTS)) zumeist nachgelagert und somit unabhängig zur eigentlichen Layoutplanung (Anordnung der Anlagen und Läger) [Paw14]. Einflüsse durch die Auswahl von Transportmitteln auf die Gestaltung des Layouts werden bei der Layoutplanung somit nicht berücksichtigt und ergeben sich häufig erst zum Ende des eigentlichen Fabrikplanungsprozesses. Die Auswahl eines bestimmten Transportsystems kann somit umfangreiche Anpassungen am Layout bedingen. Ein weiteres Problem ist, dass das für diese Planungen benötigte Fachwissen nur bei Experten vorliegt, dieses KMU aber nicht aufwandsarm und kostengünstig zugänglich ist.

Vor diesem Hintergrund wurde ein Expertensystem zur automatisierten und integrierten Transportmittelauswahl und Layout- sowie Transportnetzplanung entwickelt, welches KMU über einen webbasierten Softwaredemonstrator die Inhalte aufwandsarm bereitstellt. Dafür ist zunächst eine Ausgangsbasis geschaffen worden, in der die Einflüsse auf die Layoutgestaltung sowie die Einflüsse der Transportmittel auf Layoutgestaltung untersucht worden sind. Zudem sind bezüglich der Transportmittelauswahl und Transportnetzauslegung morphologische Kästen erstellt worden. Auf Basis dessen ist mittels einer Fuzzy-Logik und der Kombination des morphologischen Kastens zur Transportmittelauswahl das Expertenwissen zur Transportmittelauswahl abgebildet worden. Hierzu ist das Expertenwissen in einer Regelbasis verarbeitet worden und mit den Auswahlkriterien aus dem morphologischen Kasten verbunden worden. Auf Basis dieser Information ist der erste Teil des Softwaredemonstrators aufgebaut worden, der sich mit der automatisierten Transportmittelauswahl beschäftigt.

Zur Umsetzung der automatisierten Layout- und Transportnetzplanung ist im ersten Schritt ein mathematisches Modell zur Layoutplanung entwickelt und validiert worden. Dieses bildet die Basis zur Berechnung des späteren Layouts. Zusätzlich sind zur Auslegung und Berechnung der Transportnetze ein Graphennetzansatz entwickelt und zur Lösung verschiedene Wegfindungsalgorithmen betrachtet worden.

Darauf aufbauend sind die Ergebnisse mit der Transportmittelauswahl in einem webbasierten Softwaredemonstrator implementiert und validiert worden.

Das Ziel des Vorhabens wurde erreicht.

2. Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche

Problemstellung

Die steigende Marktdynamik als auch ein erhöhter Kostendruck infolge einer globalisierten Produktion veranlassen produzierende Unternehmen sich an die veränderten Rahmenbedingungen anzupassen. Durch eine kontinuierlich veranlasste innovative Fabrikplanungstätigkeit und damit einer Anpassung oder Neukonfiguration der Fabrikstrukturen kann die Wettbewerbsfähigkeit der Industrieunternehmen aufrechterhalten und gesteigert werden. Die dafür angewandte Disziplin der Fabrikplanung bezeichnet dabei die systematische

und ganzheitliche Gestaltung der Fabrik mit dem Ziel, die Kosten zu minimieren und die Effektivität zu erhöhen [Paw14]. Trotz des ganzheitlichen Fabrikplanungsansatzes erfolgen die Transportmittelauswahl (z. B. Schubmaststapler, Routenzug, Rollenbahn) und die Planung der Transportnetze (z. B. Wegenetz für fahrerlose Transportsysteme (FTS), Schienen für Hängebahnen) zumeist nachgelagert und somit unabhängig zur eigentlichen Layoutplanung (Anordnung der Anlagen und Läger). Einflüsse durch die Auswahl von Transportmitteln auf die Gestaltung des Layouts werden bei der Layoutplanung somit nicht berücksichtigt und ergeben sich häufig erst zum Ende des eigentlichen Fabrikplanungsprozesses. Die Auswahl eines bestimmten Transportmittels kann somit umfangreiche Anpassungen am Layout bedingen. Dieses stellt ein erkanntes Problem auf Seiten der Wirtschaft dar. Aktuell werden in der groben Dimensionierung der Fabrikstrukturen (Strukturplanung) Transportflächen lediglich über einen Zuschlagsfaktor zwischen 20% und 25% der Gesamtfläche berücksichtigt [Wie14].

Die richtige Dimensionierung der Transportflächen und die Auswirkungen auf das Layout ist dabei abhängig vom gewählten Transportmittel, bei der Materialbereitstellung durch einen Routenzug kann es beispielsweise vorteilhaft sein die Maschinen in U-Form anzuordnen, wobei der Wenderadius des Routenzuges berücksichtigt werden muss. Bei dem Einsatz einer Schwerkraftrollenbahn zwischen zwei Prozessen sollten die Maschinen dicht aneinander angeordnet werden, da ein Gefälle von vier Grad nicht unterschritten werden darf und somit die Aufgabe der Transporteinheit sehr hoch gelegen wäre. Unterschiedliche Transportmittel in einer Produktion ergeben zudem veränderte Anforderungen an die Planung des Transportnetzes (bspw. die Überschneidungen von FTS und manuellem Transport). Das für diese Planungen benötigte Fachwissen liegt bei Experten vor, ist KMU aber nicht aufwandsarm und kostengünstig zugänglich.

3. Gegenüberstellung angestrebter Teilziele und erzielter Ergebnisse

Das Forschungsvorhaben basiert auf der Hypothese, dass in den derzeitigen Ansätzen der Layoutplanung die Einflüsse von Transportmitteln nicht berücksichtigt werden. Die Transportmittelauswahl sowie die Transportnetzplanung finden nachgelagert zur Layoutplanung statt. Die Betrachtung der Auswirkungen, die aus der Transportmittelauswahl auf die Gestaltung des Fabriklayouts resultieren, erfolgt somit erst zum Ende des Fabrikplanungsprozesses. Die Selektion bestimmter Transportmittel kann demzufolge umfangreiche Anpassungen am Layout nach sich ziehen.

Das Ziel des Forschungsvorhabens war die Entwicklung eines regelbasierten Expertensystems zur Auswahl von Transportmitteln sowie integrierter Erstellung materialflusseffizienter Layouts. Hierdurch sollen Unternehmen eine parallele und damit ganzheitliche Layoutplanung mit reduziertem Aufwand ermöglicht werden. Dabei wurden die Auswirkungen der Auslegung eines Transportmittels auf die Fabrikstrukturen und damit das Fabriklayout berücksichtigt.

Teilziel 1:

Angestrebtes Teilziel aus dem Forschungsantrag: Aufnahme von Expertenwissen zu den Einflüssen von Transportmitteln auf das Layout. Dazu sind sowohl die Eigenschaften der

Transportmittel, der Transportgüter (Produkte) und des Layouts aufzunehmen und deren Abhängigkeiten zu identifizieren

Korrespondierende Ergebnisse des Vorhabens: Im Rahmen des Forschungsprojekts sind mittels Literaturrecherche und anschließenden Experteninterviews ein morphologischer Kasten zur Transportmittelauswahl, ein morphologischer Kasten zur Transportnetzauslegung sowie Einflüsse auf die Layoutgestaltung und Einflüsse der Transportmittel auf die Layoutgestaltung betrachtet und untersucht worden.

Die Einflussfaktoren bei der Layoutgestaltung sind hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf das Layout bewertet worden, ebenso wie die Einflüsse der einzelnen Transportmittelarten auf die Layoutgestaltung. Der morphologische Kasten zur Transportmittelauswahl bildet die Grundlage für den Aufbau der späteren Fuzzy-Logik. Hierbei wurde darauf geachtet vor allem die Faktoren abzubilden, die einen entscheidenden Einfluss für den Nutzer auf die Transportmittelauswahl haben. Der morphologische Kasten zur Transportnetzauslegung, dient als Basis für die Transportnetzplanung innerhalb der automatisierten Layoutgestaltung.

Das erste Teilziel wurde erreicht.

Teilziel 2:

Angestrebtes Teilziel aus dem Forschungsantrag: Systematisierung des Expertenwissens durch die Erstellung einer Regelbasis sowie einer Fuzzy-Logik und deren Überführung in ein zweistufiges Expertensystem (Transportmittelauswahl, Layout- und Transportnetzplanung).

Korrespondierende Ergebnisse des Vorhabens: Für die Erfüllung des zweiten Teilziels ist in einem ersten Schritt die Überführung der Wertebereiche aus dem morphologischen Kasten zur Transportmittelauswahl in Fuzzy-Sets und deren Abbildung über Zugehörigkeitsfunktionen erfolgt. Anschließend ist eine mehrstufige Entscheidungshierarchie zum Aufbau der Fuzzy-Logik und der damit einhergehenden Regelbasis aufgebaut worden, um die Anzahl an benötigten WENN-DANN Beziehungen zu reduzieren. Auf Basis der Zugehörigkeitsfunktionen und der Entscheidungshierarchie ist die Regelbasis für die Eingangsparameter sowie die Zwischenstufe der Entscheidungshierarchie erstellt worden.

Anschließend ist ein zweistufiges System konzipiert worden, welches sich aus der Transportmittelauswahl, der Layout- und der Transportnetzplanung zusammensetzt. Die Transportmittelauswahl sowie die Layout- und Transportnetzplanung können dabei unabhängig voneinander durchgeführt werden oder aufeinander aufbauend.

Das zweite Teilziel wurde erreicht.

Teilziel 3:

Angestrebtes Teilziel aus dem Forschungsantrag: Aufbau und Validierung des Expertensystems durch die Entwicklung eines Softwaredemonstrators und den Abgleich der Ergebnisse des Expertensystems mit bereits durchgeführten Fabrik- und Transportmittelplanungen.

Korrespondierende Ergebnisse des Vorhabens: Nachdem der Aufbau der Fuzzy-Logik und die Konzeption des Expertensystems erfolgt ist, ist darauf aufbauend die Implementierung des Gesamtsystems erfolgt. Hierzu ist einem ersten Schritt die Transportmittelauswahl und damit einhergehend die Fuzzy-Logik in Python implementiert worden.

Zur Implementierung der Layout- und Transportnetzauslegung ist zu Beginn ein mathematisches Modell für die automatisierte Layoutplanung entwickelt und mittels Experimenten validiert worden. Darauf aufbauend ist die Gestaltung der Transportnetzauslegung unter Verwendung von Wegfindungsalgorithmen betrachtet und implementiert worden. Das Gesamtsystem der automatisierten Layoutplanung ist anschließend in Python implementiert worden. Neben der Entwicklung des Backends, basierend auf Transportmittelauswahl, Layout- und Transportnetzplanung ist die Entwicklung des Frontends für die Nutzerinteraktion mit dem System in Java-Script erfolgt. Um einen möglichst einfachen Zugriff auf das System zu gewährleisten ist dieses abschließend auf einem Cloud-Server gehostet worden.

Die einzelnen PA-Mitglieder konnten den Demonstrator auf diese Weise sehr einfach testen und mittels ihres Expertenwissens validieren.

Das Dritte Teilziel wurde erreicht.

4. Erzielte Ergebnisse

Zur Darstellung der Ergebnisse wird sich an den oben genannten Teilzielen orientiert. Im ersten Schritt erfolgt die Beschreibung der Ausgangsbasis für das spätere Expertensystem. Hierzu wird eine kurze Übersicht über die verschiedenen Transportmittelarten im Bereich des Stückgütertransports gegeben. Darauf aufbauend umfasst der Abschnitt die Beschreibung der Einflüsse auf die Layoutgestaltung, der Einflüsse der Transportmittel auf die Layoutgestaltung, den morphologischen Kasten zur Transportnetzauslegung sowie den morphologischen Kasten zur Transportmittelauswahl.

Im zweiten Abschnitt erfolgt dann die Verarbeitung der Ergebnisse zur Transportmittelauswahl mittels einer Fuzzy-Logik. Hierzu wird eine kurze Einleitung in das Themengebiet der Fuzzy-Logik geben und anschließend die gewählten Zugehörigkeitsfunktionen, die Regelbasen und die dem Expertensystem zugrundeliegende Entscheidungshierarchie erläutert.

Im dritten Abschnitt wird zu Beginn die Konzeption des Gesamtsystems zur automatisierten und integrierten Layoutplanung vorgestellt. Auf Basis dessen erfolgt die Darstellung der Implementierung der Transportmittelauswahl mittels Fuzzy-Logik.

Zur Abbildung der automatisierten Layout- und Transportnetzplanung wird zudem ein mathematisches Modell zur Layoutplanung vorgestellt sowie der gewählte Ansatz zur Transportnetzplanung, basierend auf einem Graphennetz und Wegfindungsalgorithmen dargelegt. Wie bei der Transportmittelauswahl wird auch hier die Implementierung des Systems vorgestellt.

Abschließend erfolgt die Beschreibung der Validierung des Systems.

4.1. Ausgangsbasis

Aufgrund der thematischen Nähe von AP 1 und AP 2 zueinander sind die Inhalte der Arbeitspakete zusammen bearbeitet worden. Zur besseren Darlegung der Ergebnisse aus AP 1

und AP 2 wird der Aufbau der folgenden Abschnitte leicht von dem Aufbau der Arbeitspakete aus dem Forschungsantrag abweichen.

4.1.1.Überblick Transportmittelarten

Im Rahmen des Forschungsprojektes stand der innerbetriebliche Transport von Stückgütern im Fokus. Ein innerbetriebliches Transportmittel setzt sich aus den Fördermitteln, den Fördergütern, sowie den Förderaufgaben zusammen. Fördermittel sind technische Einrichtungen, die zur mittelbaren oder unmittelbaren Fortbewegung von Gütern dienen. Sie erfüllen dabei die Funktionen des Transportierens, Umschlagens, Stapelns, Lagerns und Kommissionierens von Gütern [Mar16].

Die Fördermittel können auf der obersten Ebene in Stetig- und Unstetigförderer untergliedert werden, wobei letztere in der Umsetzung vorrangig betrachtet worden sind. Stetigförderer sind Fördermittel, die einen kontinuierlichen Fördergutstrom auf einem festgelegten Weg erzeugen. Aufgrund ihrer Eigenschaften sind Stetigförderer besonders für das Fördern großer Mengen bei festgelegten Wegen geeignet [Kri12]. Unstetigförderer fördern in einzelnen Arbeitsspielen. Zu den Arbeitsspielen zählen sowohl Last-, als auch Leerfahrten. Im Gegensatz zu Stetigförderern sind diese geeignet für das Fördern von kleinen und mittleren Mengen mit sich verändernden Wegen [Kri12]. Abbildung 4.1 gibt einen Überblick über die weitere Untergliederung der einzelnen Transportmittelarten.

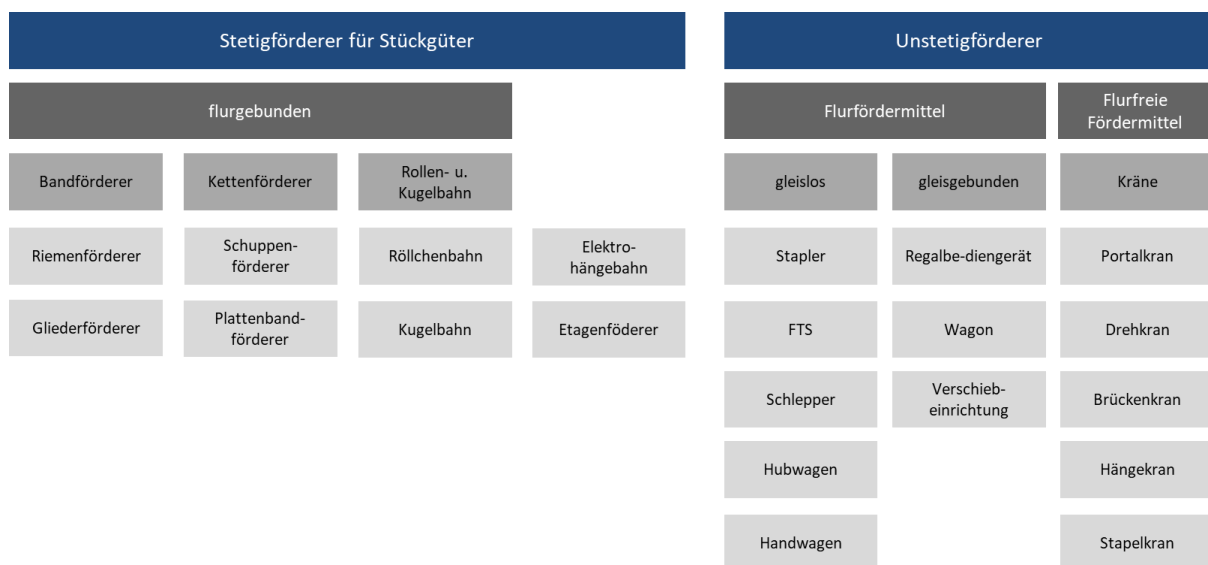


Abbildung 4.1: Übersicht Transportmittelarten

Eine weitere Betrachtung der Transportmittelarten sowie deren Einflussfaktoren auf die Layoutgestaltung erfolgt in Abschnitt 4.1.3.

4.1.2. Identifikation der Einflüsse auf die Layoutgestaltung

Im ersten Schritt erfolgt die Darstellung des Bewertungssystems zur Beschreibung von Einflussfaktoren. Darauf aufbauend werden verschiedenen Einflussfaktoren auf die Layoutgestaltung vorgestellt.

Das Bewertungsschema in Abbildung 4.2 soll den Einflussfaktor von einer Transportmittelart auf einen spezifischen Bereich der Layoutgestaltung qualitativ bewertbar machen (siehe Abbildung 4.3). Die Bewertung ist anhand von Informationen aus den Experteninterviews mit dem PA erfolgt

und untergliedert sich in fünf Bereiche Kein Einfluss, Geringer Einfluss, Mittlerer Einfluss, Hoher Einfluss und Besonders hoher Einfluss.

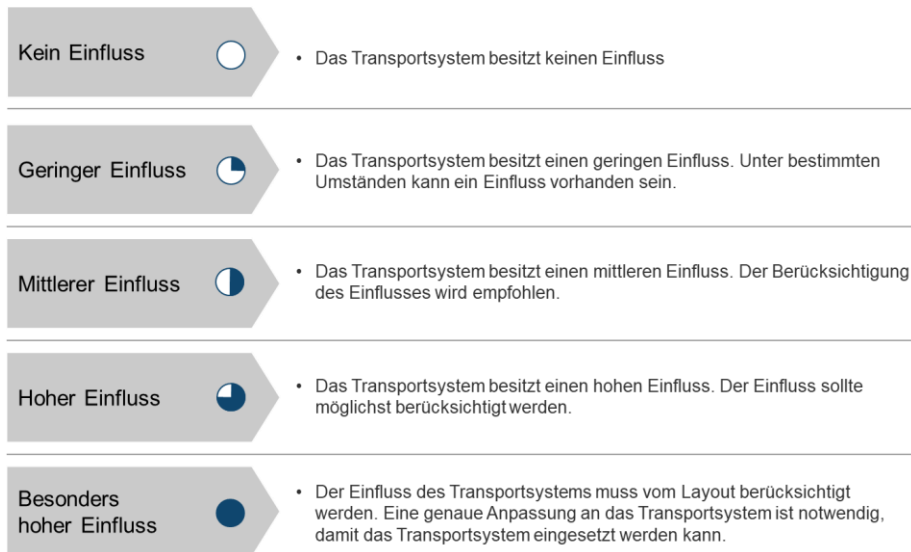


Abbildung 4.2: Bewertungsskala Einflüsse

Unter Zuhilfenahme des Bewertungsschemas und den Informationen aus den Experteninterviews sind verschiedene Einflussfaktoren auf die Layoutgestaltung identifiziert und deren Auswirkungen beschrieben worden. In Abbildung 4.3 sind die einzelnen Einflussfaktoren (rechts) nach den übergeordneten Bereichen (links) in einer Abbildung zusammengeführt worden.

Die Förderwege können sich anhand zweier Größen auf die Layoutgestaltung auswirken. Zum einen bestimmt die Gestalt des Förderweges die Anordnung und Anzahl der Wege, zum anderen bestimmt die Förderwegbreite die benötigten Flächen des Förderweges. Darüber hinaus sind in der Fertigung Pufferflächen und Lastübergabestellen zu berücksichtigen. Diese sind für einen reibungslosen Verlauf unerlässlich, ihr Einsatz hängt jedoch ebenfalls von dem gewählten Transportmittel ab. Die bereits erstellten Steckbriefe (Beispiel siehe Anhang 13.1) zeigen, dass die Transportmittel mit ihren Spezialisierungen zu unterschiedlichen Lagerarten führen, die das Layout maßgeblich in Bezug auf Höhe, Fläche und Anordnung beeinflussen. Zusätzliche Flächen wie Ladestationen oder IT-Räumlichkeiten besitzen einen geringen Anteil der Gesamtfläche, jedoch können sie das Layout beeinflussen, in dem diese in ungünstigen Fällen andere Flächen begrenzen. Die zu bewertenden Bereiche sind in Abbildung 4.3 zusammengefasst.

Einfluss der Kriterien auf die Layoutgestaltung		
Gestalt des Förderwegs	Grundstruktur	
	Zusätzliche Wege	
	Personenverkehr	
Wegbreite	Verkehrswegbreite	
	Einbahn-/Direktverkehr	
	Arbeitsgang	
	Kurvenbereich	
Anordnung Fertigung und Montage	Fertigungsprinzip	
Gestalt und Größe des Lagers	Breite	
	Höhe	
	Grundkonzeption	
Pufferflächen und Lastübergabestellen	Pufferflächen	
	Lastübergabestellen	
Zusätzliche Flächen	Ladestation	
	IT-Raum	
	Stützpfeiler	

Abbildung 4.3: Einfluss der Kriterien auf die Layoutgestaltung

4.1.3. Identifikation der Einflüsse von Transportmitteln auf die Layoutgestaltung

Basierend auf den Einflussfaktoren zur Layoutgestaltung ist untersucht worden, wie hoch der Einfluss der verschiedenen Transportmittelarten auf diese ist. Für die abschließende Bewertung der Einflüsse der Transportmittel werden Einflussfaktoren berücksichtigt. Zur besseren Übersichtlichkeit wird für jedes Transportmittel ein Durchschnittseinfluss der Einflussfaktoren für den jeweiligen Bereich gebildet. Bei diesem Durchschnittseinfluss wird die aus Abbildung 4.3 resultierende Gewichtung der Einflussfaktoren in den übergeordneten Bereichen einbezogen. Eine genaue Auflistung und Unterteilung der einzelnen Einflüsse der Transportmittel auf die Layoutgestaltung kann dem Anhang entnommen werden (siehe 13.2).

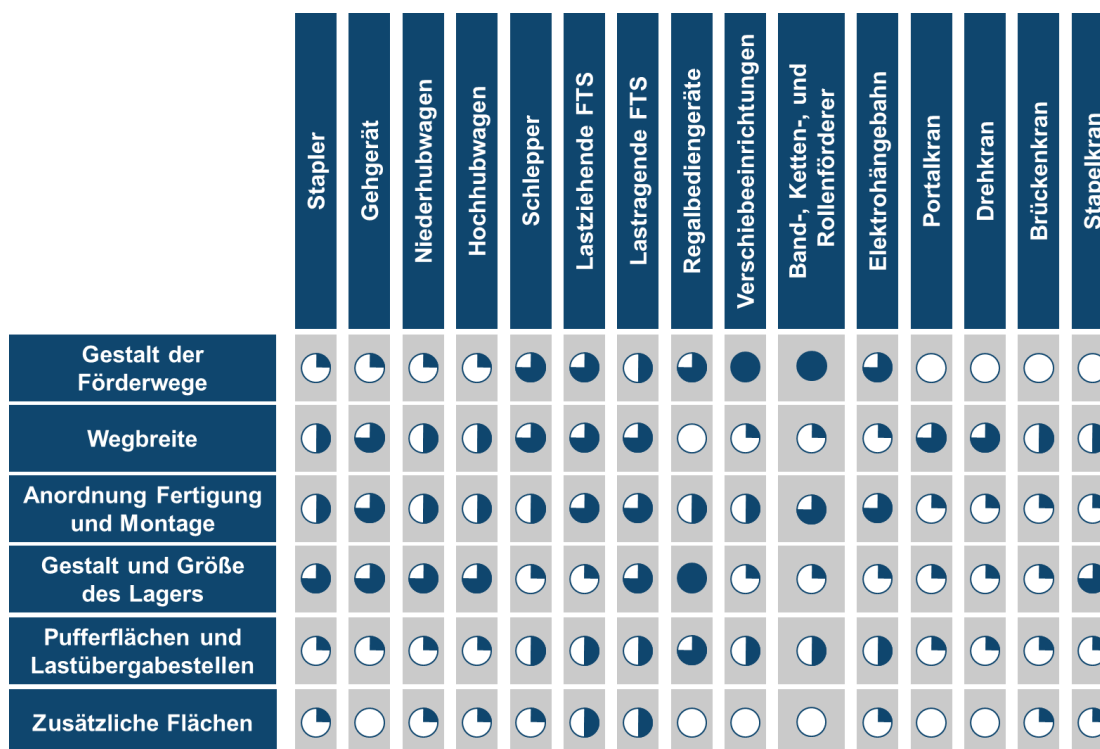


Abbildung 4.4: Einflüsse der Transportmittel auf die Layoutgestaltung

Die Gestalt der Förderwege wird durch Unstetigförderer eher wenig beeinflusst. Ausnahmen bilden hier die lastziehenden Transportmittel, da hier ein deutlich höherer Wenderadius eingeplant werden muss. Den größten Einfluss auf den Bereich Gestalt der Förderwege besitzen die Stetigförderer, da dieses als zusätzliche Sperrflächen im Layout berücksichtigt werden müssen und die Gestalt der Förderwege stark beeinflussen können. Die Wegbreite wird vor allen Dingen durch die Entscheidung zwischen uni- oder bidirektionalen Verkehr beeinflusst. Transportmittel, die nur einen klar definierten Arbeitsbereich besitzen (z. B. Kräne) haben einen deutlich höheren Einfluss auf die Anordnung der Fertigung und Montage als Unstetigförderer. Diese Eingrenzung kann nachher bei der Transportmittelauswahl Berücksichtigung finden, um eine Transportmittelart auszuwählen, die unter anderem eine entsprechende Wegflexibilität aufweist. Beispielsweise sind Gehgeräte (z. B. Gabelhubwagen) für eine kurze Distanz geeignet und sehr flexibel bei der Nutzung neuer Wege.

Zusätzlich besitzt die Auswahl einer geeigneten Transportmittelart einen hohen Einfluss auf die Gestalt und Größe des Lagerbereichs. Stapler, Gehgeräte, Niederhubwagen, Hochhubwagen, lastragende fahrerlose Transportsysteme oder Stapelkräne unterscheiden sich in ihrer Arbeitsgangbreite und Hubhöhe sehr deutlich. Die Möglichkeiten der Gestaltung des Lagers sind daher sehr vielfältig. Einen besonderen Einfluss erhält das Lager durch das Regalbediengerät, da es sehr spezifisch für die Anforderungen in dem Lagerbereich konstruiert ist, eine feste Arbeitsgangbreite besitzt und sehr hohe Höhen realisieren kann. Das Regalbediengerät kann daher durch das Lager einen sehr großen Einfluss auf die Layoutgestaltung nehmen.

Pufferflächen und Lastübergabestellen beeinflussen die Layoutgestaltung über die Verortung und die Flächengröße. Die Flächengröße richtet sich unter anderem nach den Förderhilfsmitteln und der Pufferfähigkeit der Transportmittel. Der Einfluss der Lastübergabestellen zeigt sich durch die Verortung. Während flexible Systeme die Last an unterschiedlichen Stellen aufnehmen können, benötigen unflexible Systeme wie das Regalbediengerät feste Lastübergabe stellen. Diese

Flächen müssen auf unterschiedliche Weise eingeplant werden und bilden kleine zu berücksichtigende Sperrflächen im Layout.

Zusätzliche Flächen kommen für bestimmte Transportmittel vereinzelt mit einem geringen Anteil der Gesamfläche vor (z. B. Ladestationen für FTF). Die zusätzlichen Flächen wie Ladegeräte, Stützpfeiler oder IT-Räume bilden dabei weitere Flächen, die im Layout zu berücksichtigen sind.

4.1.4. Morphologischer Kasten zur Auslegung von Transportnetzen

Für die Identifizierung der Eingangsfaktoren zur Auslegung von Transportnetzen ist ein morphologischer Kasten entwickelt worden. Dieser ist in drei übergeordnete Klassen unterteilt Layout, Transportsystem und Transportprozess (siehe Abbildung 4.5). Ein automatisierter Ansatz zur Auslegung von Wegenetzen besteht derzeit nur für FTF und Routenzüge. Für die adäquate Auslegung von Wegenetzen innerhalb der Intralogistik existiert derzeit kein Ansatz, welcher eine übergreifende Transportmittelauswahl berücksichtigt. Dieser Zwischenschritt wird benötigt, um zukünftig eine automatisierte und integrierte Fabrikplanung zu entwickeln, die sowohl die Transportmittelauswahl, die Auslegung geeigneter Wegenetze sowie die Fabrikplanung umfasst.

Bei der Auslegung des Transportnetzes gibt es eine Vielzahl an Parameter, die einen Einfluss auf das Transportnetz haben. Dies geschieht durch die Auswahl von Charakteristiken, die das System erfüllen soll. Das System nähert sich auf diese Weise einer Lösung an. Als Ergebnis erhält der Anwender für das ausgewählte Transportmittel eine Empfehlung für ein Wegenetz. Diese Herangehensweise wird bei der Festlegung der Parameter und den zugehörigen Charakteristiken beachtet. Die Ausprägung der einzelnen Charakteristika basiert auf durchgeführten Literaturrecherchen und Abstimmungen mit dem PA.

Das Klasse Layout ist berücksichtigt worden, da unter anderem die daraus resultierende Anordnung der Maschinen einen Einfluss auf die Ausprägung von Risikobereichen hat. Risikobereiche z. B. hervorgerufen durch Personenverkehr, sind in der Auslegung von Wegenetzen, aufgrund der Kollisionsgefahr sowie aufgrund eines erhöhten Risikos für Stillstände zu vermeiden. Der Straßentyp ist ein weiteres Kriterium bei der Auslegung von Transportnetzen, welcher die Abbildung zwischen Fahrwege mit und ohne Überholmöglichkeiten sowie Fahrwege mit Begegnungsverkehr ermöglicht. Dieser Faktor hat später insbesondere einen Einfluss auf die Materialflusslänge, wenn z. B. nur unidirektionaler Verkehr (Fahrwege ohne Begegnungsverkehr) berücksichtigt wird sowie auf die benötigte Wegbreite. Der Abstand zu den deklarierten Sperrflächen stellt ein weiteres Kriterium dar, welcher von der Breite des Transportmittels abhängig ist und so die Nutzung bestimmter Fahrwege verhindert.

Ein weiterer Einflussfaktor in dem Gestaltungsfeld Layout ist die Neigung der Förderstrecke. Für die Nutzung der Transportwege ist es wichtig, ob die Steigung von der entsprechenden Transportmittelart überwunden werden kann. Bei einem FTF zum Beispiel liegt die Grenze der überwindbaren Steigung bei 5 bis 7 Prozent [Ull14]. Ein Dreirad-Frontstapler beispielsweise kann hingegen eine Steigung von 15% passieren [Pfe89].

Das Gestaltungsfeld Transportsystem ist gekennzeichnet durch die Einflussfaktoren Breite, Länge, Wenderadius und Zulässigkeit von Kreuzungen. Hierbei ist es wichtig, ob die Wegenetzplanung für Stetig- oder Unstetigförderer durchgeführt werden soll.

Die Breite der Transportmittel ist unter anderem bei den Unstetigförderern wichtig, da hier in den Kurvenbereichen sowie zum Rangieren zusätzlicher Platz bei der Wegeplanung berücksichtigt werden muss. Analog zur Breite ist die Länge der Fahrzeuge zu berücksichtigen, auch in Hinblick auf die Kurven und Rangiermöglichkeiten.

Der Wenderadius wird nur bei Unstetigförderer berücksichtigt, da Stetigförderer generell eine feste Förderbahn bilden und nicht wenden müssen. Der Wenderadius ist abhängig von den Abmessungen des Transportmittels und kann sich je nach Transportmittel stark unterscheiden (siehe Anhang Abbildung 13.7).

Ein weiterer Einflussfaktor ist die Zulässigkeit von Kreuzungen, da eine erhöhte Anzahl von Kreuzungen das Transportnetz komplexer gestaltet. Zudem bieten Kreuzungen ein erhöhtes Risiko für Kollisionen und Stillstände. Kreuzungen wirken sich allerdings nicht immer negativ auf die Gestaltung von Transportnetzen aus. Sie bieten z. B. den Vorteil die Materialflusslänge entlang der Transportwege deutlich zu reduzieren. So kann zum Beispiel das Vermeiden einer Kreuzung zum Zielort den gesamten Transportweg verlängern (siehe Anhang Abbildung 13.8). Generell sollten Kreuzungen vermieden werden, wenn die Geschwindigkeit des Transportmittels gering ist und die Nutzung des Weges hoch ist, da aufgrund der geringen Geschwindigkeit die Kreuzung länger blockiert und für andere Transportmittel nicht nutzbar ist. Außerdem gilt je höher der Nutzungsgrad des Weges ist, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit, dass sich ein Fahrzeug auf dieser Kreuzung befindet [Utt18].

Prinzipiell sind Kreuzungen zwischen zwei Wegen zulässig. Zu unterscheiden ist hierbei wieder zwischen Stetigförderer, welche dauerhaft eine Fläche im Layout belegen und Unstetigförderern, welche gemeinsam ein entsprechendes Wegenetz nutzen können. Eine Kreuzung der Wege zwischen Stetig- und Unstetigförderern, wie zum Beispiel Gabelstaplern und Bandförderer ist nicht möglich, da hier nicht die Möglichkeit des Aufständerns und der Unterführung von Stetigförderern berücksichtigt wurde. Es können sich daher nur Wege zwischen Unstetigförderern kreuzen.

Das dritte Gestaltungsfeld im morphologischen Kasten bildet den Einfluss des Transportprozesses auf die Wegenetzauslegung ab. Der entscheidende Einflussfaktor hier ist der geplante Durchsatz innerhalb des zu betrachtenden Bereiches. Dieser hat insbesondere einen Einfluss darauf in dem Wegenetz eine ausreichende Staukapazität vorzusehen. Bei einer sehr hohen Auslastung eines Transportwegs besteht ein hohes Risiko für Staus und Blockierungen und somit für Kollision. Transportwege mit einem sehr geringen Transportaufkommen sind ebenfalls nicht optimal, da in diesem Fall eventuell zwei Transportwege zusammengeführt werden können und somit zusätzliche Freiflächen geschaffen werden können.

Klasse	Kriterium	Charakteristik		
		Einbahnstraße mit Überholmöglichkeit	Einbahnstraße ohne Überholmöglichkeit	Begegnungsverkehr
Layout	Straßentyp			
	Abstand zur Sperrfläche	Gering (< 1,5*TM))	Mittel ((1,5 – 2,5)*TM)	Hoch (> (2,5*TM))
	Risikofaktor	Gering (0 – 0,3)	Mittel (0,3 – 0,7)	Hoch (0,7 – 1,0)
	Neigung	Gering (< 5%)	Mittel (5 – 15%)	Hoch (> 15%)
Transportsystem	Breite	Bis 1m	1 m bis 1, 5 m	1,5 m bis 2 m
	Länge	< 2m	2 m bis 3 m	> 3 m
	Wenderadius	< 1,5 m	1,5 m bis 2 m	2 m bis 3m
	Zulässigkeit von Kreuzungen	Möglich		Nicht Möglich
Transportprozess	Durchsatz	Gering (< 10 FE/h)	Mittel (10 – 50 FE/h)	Hoch (> 50 FE/h)

Abbildung 4.5: Morphologischer Kasten zur Transportnetzauslegung

4.1.5.Morphologischer Kasten zur Transportmittelauswahl

Das Ziel dieses morphologischen Kastens ist es auf Grundlage der Anforderungen und Restriktionen des Nutzers eine Auswahl an möglichen Transportmitteln für den jeweiligen Anwendungsfall zu geben. Der Fokus des Auswahlsystems liegt auf der Betrachtung des innerbetrieblichen Stückgütertransports. Die Entwicklung des morphologischen Kastens ist auf Basis von bestehenden Arbeiten zu diesem Thema sowie auf Grundlage von Experteninterviews durchgeführt worden.

Der morphologische Kasten (siehe Abbildung 4.6) ist in die fünf Klassen Fördereinheit, Fertigung, Förderstrecke, Förderprozess und Flexibilität unterteilt, die sich wiederum in verschiedene Kriterien differenzieren lassen. Jedem Kriterium sind anschließend verschiedene Charakteristika zugeordnet worden, die unter anderem aus den Interviews abgeleitet wurden. Das Kriterium Max. Gewicht, welches der Klasse Fördereinheit zugeordnet ist, ist bspw. in fünf Charakteristika untergliedert. Jede dieser Charakteristika bildet später ein Fuzzy-Set. Dadurch ist der Anwender bspw. nicht gezwungen eine der entsprechenden Charakteristika auszuwählen, sondern kann die Eingaben auf seinen Anwendungsfall abstimmen. Die Angabe zum maximalen Gewicht der Fördereinheit kann somit z. B. bei 1150 kg liegen, statt bei 500 kg oder 1500 kg.

Die Fördereinheit setzt sich zusammen aus dem Fördergut und dem Förderhilfsmittel. Dieses Kriterium ist gewählt worden, da sich Fördergüter in Form, Masse, Abmessungen, stofflichen Eigenschaften und Empfindlichkeiten stark unterscheiden können. Die direkte Betrachtung von Fördergütern im Auswahlsystem ist dementsprechend mit einer deutlich höheren Komplexität verbunden. Die Folge daraus ist die Nutzung von Förderhilfsmitteln (Paletten, Kleinladungsträger etc.), die die Vielfalt reduzieren und das Handhaben standardisieren. Für die Transportmittelauswahl ist daher nicht das Fördergut selbst das entscheidende Kriterium, sondern die Fördereinheit als Gesamtes.

Die Charakteristika zu den maximalen Abmessungen sind aus den Abmessungen der Kleinladungs- und Großladungsträger abgeleitet. Kleinladungsträger besitzen Abmessungen von bis zu 800 mm x 600 mm. Großladungsträger werden in einem Bereich mit den Abmessungen von 800 mm x 600 mm bis 1200 mm x 1000 mm beschrieben [Mar16].

Die Unterteilung des maximalen Gewichts orientiert sich unter anderem an den Traglasten der Klein- und Großladungsträger und an den Angaben aus den Experteninterviews zu den einzelnen Transportmitteln. Kleinladungsträger besitzen eine Traglast von z. B. bis zu 50 kg und eine Palette z. B. von 1500 kg.

Die Handhabung ist als Kriterium berücksichtigt worden, da der Transport einer unterfahrbaren Fördereinheit nicht mit einem Transportmittel gewährleistet werden kann, welches dieses Kriterium nicht erfüllt. Deshalb ist eine Unterteilung in unterfahrbar und nicht unterfahrbar als sinnvoll erachtet worden.

Die Klasse Fertigung ist gekennzeichnet durch den Einflussfaktor Schichtmodell. Die Berücksichtigung des Schichtmodells wird vorgenommen, da hierüber eine implizite Berücksichtigung über die benötigten Personalkosten erfolgt. Bei der Notwendigkeit zur Steuerung des Transportmittels mittels Personals, erhöht eine höhere Anzahl der Schichten den Personalaufwand. Dies ist insbesondere ausschlaggebend im Drei-Schicht-Betrieb, weshalb dort automatisierte Transportmittel in der späteren Fuzzy-Logik als geeigneter berücksichtigt werden gegenüber personengeführten Transportmitteln. Im Ein-Schicht-Betrieb würde eine derartige

Lösung als prinzipiell schlechter geeignet berücksichtigt werden, da mit einer automatisierten Lösung höhere Investitions- und Wartungskosten einhergehen.

Eine weitere Klasse für die Auswahl des Transportmittels ist die Förderstrecke, welche in dem morphologischen Kasten in die zwei Kriterien horizontal und vertikal unterteilt ist. Beim horizontalen Fördern stellt sich die Frage nach der Förderdistanz. Sie unterscheidet zwischen dem Einsatz von Transportmitteln die für eine kurze Strecke, mittlere Strecke und lange Strecke vorwiegend geeignet sind. Bei kurzen Strecken eignen sich unter anderem Gabelhubwagen, da der Aufwand des Transportes als gering eingeschätzt wird. Demgegenüber sind Schlepper bei sehr langen Strecken sinnvoll, da sie mehrere Einheiten gleichzeitig transportieren können, wodurch sich die Kosten pro transportierte Transporteinheit verringern. Wie auch bei den anderen Kriterien darf der Aspekt der horizontalen Förderstrecke nicht allein betrachtet werden und steht z. B. in starker Korrelation zu dem Gewicht der Fördereinheit und den Transporten pro Stunde. Ein Handhubwagen ist prinzipiell gut geeignet für kurze Transportstrecken, dies gilt aber nur solange das Gewicht der Fördereinheit und die Anzahl der Transporte pro Stunde gering bleibt. Für das Kriterium ist eine Einteilung in drei Charakteristika gewählt worden, welche sich an den Werten 25 m und 200 m aus bestehender Literatur orientiert und in den Interviews bestätigt worden ist [Mar16, Pfe89].

Das vertikale Fördern ist insbesondere bei Aufgaben wie dem Lagern unerlässlich und bildet daher eine Restriktion für die Auswahl der Transportmittel. Die Transportmittel müssen eine definierte Höhe erreichen. Hierzu eignen sich verschiedene Hebezeuge wie ein Gabelstapler oder Regalbediengeräte. Bei der Eigenschaft der Hubhöhe der Transportmittel existieren klare Grenzen. Der Bereich bis 125 mm fällt unter die Kategorie des bodennahen Förderns und stellt keine konkrete Anforderung des Hebens dar. Mit Einbeziehung dieser Größe soll vermieden werden, dass für diesen Fall die Anforderung bis 2 Meter gestellt wird.

Der Förderprozess des Nutzers wird über die Transporte pro Stunde, Eilaufträge und den gewünschten Unterstützungsgrad beschrieben. Die Transporte pro Stunde sind unterteilt in vier Charakteristika, wobei die Charakteristik unter 15 Fördervorgängen pro Stunde die kleinste Charakteristik bildet und den geringsten Durchsatz definiert. Eine hohe Eignung für diesen Bereich weisen z. B. Gabelhubwagen und Kräne auf.

Der Unterstützungsgrad bezieht sich auf die Bedienung des Transportmittels. Es wird zwischen Manuell und Automatisiert unterschieden. Ob eine Automatisierung sinnvoll erscheint, wird innerhalb der Betrachtung der Kriterien bzgl. des Transportprozesses berücksichtigt. Jedoch kann der Anwender entgegen der Empfehlung zu einem manuellen System ein automatisiertes Transportmittel fordern. Gründe, die in den Interviews für eine Automatisierung angegeben wurden, sind unter anderem ein bereits integriertes Automatisierungssystem, Imagegründe oder die Unternehmens- und Wettbewerbsstrategie.

Die Abbildung des Kriteriums Förderwegflexibilität bietet die Möglichkeit die Anpassungsfähigkeit des Transportmittels an einen sich örtlich veränderten Materialfluss darzustellen. Der Anwender kann damit im Auswahlssystem angeben, dass eine Veränderung des Transportweges ermöglicht werden soll. Dem Kriterium sind dabei vier Charakteristika zugeordnet worden Flexibel, Veränderbar mit geringem Aufwand, Veränderbar mit großem Aufwand und Festmontiert. Der ersten Charakteristik werden Transportmittel zugeordnet, die ihren Transportweg beliebig anpassen können z. B. Gabelstapler. Der Charakteristik Veränderbar mit geringem Aufwand sind z. B. Fahrerlose Transportfahrzeuge (FTF) zugeordnet, die sich frei Raum bewegen können,

denen aber ein neuer Transportweg hinterlegt werden muss. Zu der Charakteristik veränderbar mit großem Aufwand gehören unter anderem FTF die z. B. einen Magnetstreifen zur Orientierung benötigen und dieser für den neuen Transportweg erst angelegt werden muss. Festmontiert sind z. B. Kräne, die ein Fundament benötigen.

Klassen		Charakteristik			
Förder- einheit	Max. Abmessungen	400 x 600 [mm]	800 x 600 [mm]	1200 x 1000 [mm]	> 1200 x 1000 [mm]
	Max. Gewicht	< 50 [kg]	500 [kg]	1500 [kg]	4000 [kg]
Fertigung	Handhabung	Unterfahrbar		Nicht unterfahrbar	
	Schichtmodell	1 Schicht	2 Schicht		3 Schicht
Förder- strecke	Horizontal	< 25 [m]	25 – 200 [m]		> 200 [m]
	Vertikal	125 [mm]	125 - 2000 [mm]	2000 - 6000 [mm]	> 6000 [mm]
Förder- prozess	Transporte pro Stunde	< 15 [T/h]	15 [T/h]	35 [T/h]	60 [T/h]
	Eilaufträge	Ja		Nein	
Flexibilität	Unterstützungsgrad	manuell		automatisiert	
	Förderweg- flexibilität	Flexibel	Veränderbar mit geringem Aufwand	Veränderbar mit großem Aufwand	Fest montiert

Abbildung 4.6: Morphologischer Kasten zur Transportmittelauswahl

4.2. Fuzzy-Logik

In diesem Abschnitt wird die Überführung der Informationen aus dem morphologischen Kasten zur Transportmittelauswahl in eine Fuzzy-Logik beschrieben. Hierzu wird kurz erläutert was im Allgemeinen unter Fuzzy-Logik verstanden wird. Anschließend erfolgt die Darstellung der genutzten Zugehörigkeitsfunktionen, der zugrundeliegenden Regelbasis und der übergeordneten Entscheidungshierarchie.

Fuzzy-Logik wird aus dem Englischen mit unscharfe Logik übersetzt und beschreibt dabei eine systematische Methode zur Verarbeitung von Wissen und Variablen in unscharfer Form. Diese wird heute in den Bereichen der Steuerungs- und Regelungstechnik sowie in Diagnose- und Expertensystemen verwendet.

Ein wesentlicher Unterschied zur klassischen Logik (ja/nein) ist, dass die Fuzzy-Logik nicht mehr nur zweiwertig ist. Zu den klassischen Wahrheitswerten, wie wahr oder falsch, werden bei der Fuzzy-Logik Aussagen graduell nach ihrem Wahrheitsgehalt bewertet. Das bedeutet, dass eine Aussage nicht mehr entweder eindeutig wahr oder eindeutig falsch ist, sondern zu einem bestimmten Grad beide Wahrheitswerte einnehmen kann. Ein Element kann demnach einer Menge zugeordnet sein und beispielsweise den Wert 0,8 annehmen [Zim93, Bro17, Böh93, Tra94, Kru15]. Das Element erfüllt demnach das Kriterium der Ausprägung zu einem hohen Grad.

4.2.1. Zugehörigkeitsfunktionen

In diesem Abschnitt wird ein Überblick über die gewählten Zugehörigkeitsfunktionen der Merkmalsausprägungen aus dem morphologischen Kasten zur Transportmittelauswahl gegeben.

- Als Zugehörigkeitsfunktionen sind Singleton-, Dreiecks- und Trapezfunktionen mit stückweise linearem Verlauf sowie Glockenkurven gewählt worden.
- In jedem Fuzzy-Set bzw. der linguistischen Ausprägung wurde mindestens einem Wert der Zugehörigkeitsgrad 1 und einem anderen der Wert 0 zugewiesen.
- Die maximale Anzahl linguistischer Variablen je Fuzzy-Set beträgt fünf.
- Die Zugehörigkeitsfunktionen überlappen sich bei mindestens dem Zugehörigkeitsgrad 0,5.

Die Eingangsgröße Horizontal wurde beispielsweise eingeteilt in die Wertebereiche: < 25 m, 25 m - 200 m und > 200 m. Daraus entstehen die linguistischen Variablen niedrig, mittel und hoch. Zur Beschreibung dieses Sachverhalts ist in Abstimmung mit dem PA die Trapezfunktion als geeignet identifiziert worden. In Abbildung 4.7 ist der Verlauf der Zugehörigkeitsfunktionen dargestellt. Es ist zu beobachten, dass jede linguistische Ausprägung einen Wertebereich hat, in der sie gilt. Die Schnittpunkte der Zugehörigkeitsfunktionen liegen bei dem Zugehörigkeitsgrad von ca. 0,5.

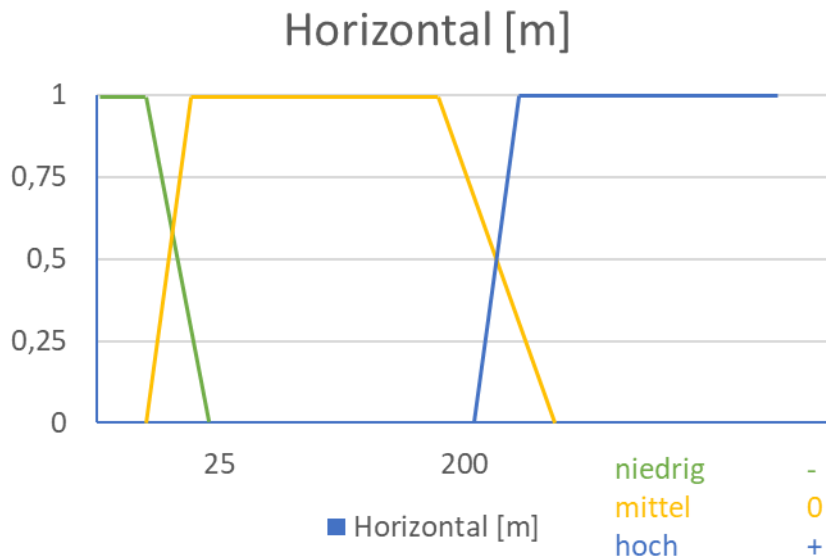


Abbildung 4.7: Zugehörigkeitsfunktionen zu dem Fuzzy-Set Horizontaler Transport

Zur Abbildung der Eingangsgröße Schichtmodell ist beispielsweise die Singletonfunktion genutzt worden, da es hier keinen fließenden Übergang zwischen den Merkmalsausprägungen gibt. Das Schichtmodell kann entweder nur ein 1-, 2-, oder 3-Schichtmodell sein aber keinen Wert dazwischen annehmen. Deshalb ist die Singletonfunktion genutzt worden, die genau bei diesen Ausprägungen einen Zugehörigkeitsgrad von 1, also 100 % aufweist und in allen Bereichen dazwischen einen Zugehörigkeitsgrad von 0 aufweist.

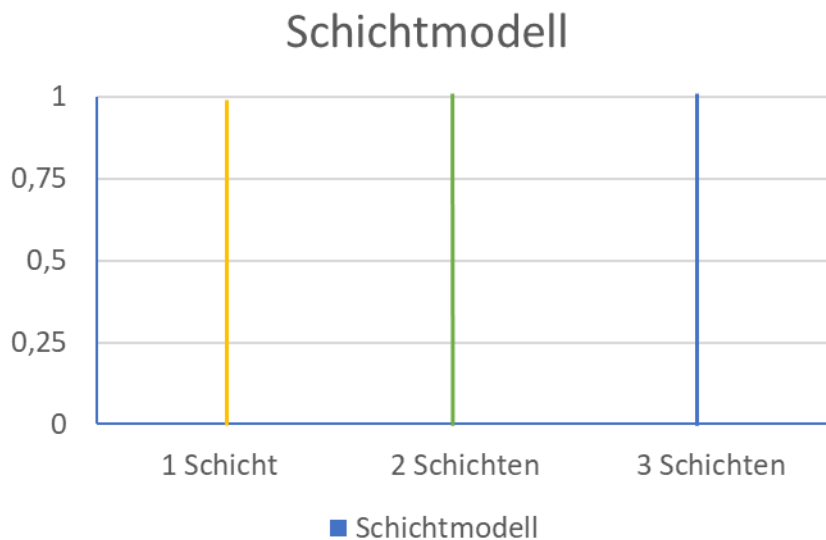


Abbildung 4.8: Zugehörigkeitsfunktionen zu dem Fuzzy-Set Schichtmodell

Eine Ausführung weiterer Zugehörigkeitsfunktionen findet sich im Anhang (siehe Abschnitt 13.5).

4.2.2.Regelbasis

4.2.2.1.Regelbasis für die Eingangsparameter

In diesem Abschnitt wird die aufgestellte Regelbasis, als Teil der Wissensbasis zur Auswahl von Transportmitteln, beschrieben. Eine Regelbasis zur automatisierten Auslegung der Layouts ist nicht aufgestellt worden, da dieses Verfahren sich an dieser Stelle als nicht zielführend herausgestellt hat. Stattdessen wird die automatisierte Auslegung der Layouts über ein mathematisches Modell beschrieben (siehe Abschnitt 4.3.2.1).

Wie einleitend erwähnt, basiert die Fuzzy-Logik auf Regeln in der Form: WENN (Prämisse), DANN (Schlussfolgerung). Mit Hilfe dieser Formulierungen ist das Expertenwissen zur Transportmittelauswahl in eine Regelbasis überführt worden.

Bei der Aufstellung der Regelbasis wurden darauf geachtet folgende Leitlinien zu berücksichtigen:

- Für die Aggregation der Regeln wird die UND-Verknüpfung verwendet.
- Es werden sowohl die unaufwändigen Minimum- und Maximum-Operatoren sowie die rechenintensiveren kompensierenden Operatoren genutzt.
- Zu jeder linguistischen Variablen der Ausgangsgröße führt mindestens eine Regel.
- Es wird versucht die Anzahl der Regeln so überschaubar wie möglich zu gestalten, indem beispielsweise Ausschlusskriterien definiert werden.
- Es ist eine Entscheidungshierarchie für die Regelbasis entworfen worden, um die Anzahl an Regeln deutlich zu reduzieren.
- Es sind mehrere Ausschlusskriterien festgelegt worden, um das abschließende Ergebnis zu verbessern

Basierend auf dem morphologischen Kasten und den damit einhergehenden Merkmalsausprägungen, den im Abschnitt zuvor aufgezeigten Zugehörigkeitsfunktionen sowie das durch den PA bereitgestellte Expertenwissen ist eine Regelbasis für das System entwickelt worden. In Abbildung 4.9 ist die Regelbasis zur Kombination der Eingangsparameter Horizontal und Vertikal dargestellt, welche anschließend die Klasse Förderbereich ergeben. Die Eingangsparameter werden über WENN-Beziehungen miteinander verknüpft und resultieren in einer entsprechenden Merkmalsausprägung des Faktors Förderbereich. Die erste Regel lautet hier nach:

- WENN der Nutzer die Anforderung an den horizontalen Transport und den vertikalen Transport klein hat
- DANN resultiert daraus, als Anforderung an das Transportmittel, ein sehr kleiner Förderbereich

WENN		DANN	
Horizontal	Vertikal	Förderbereich	
-	-	--	
-	0	-	
-	+	0	
0	-	-	
0	0	0	
0	+	+	
+	-	0	
+	0	+	
+	+	++	

sehr niedrig	[- -]	niedrig	[-]	mittel	[0]
hoch	[+]	sehr hoch	[+ +]	Ausschluss [/]	

Abbildung 4.9: Regelbasis für die Eingangsparameter Horizontal und Vertikal der Transportmittelauswahl

Die Regelbasis zur Fördereinheit findet sich im Anhang (siehe Abschnitt 13.4).

4.2.2.2. Entscheidungshierarchie

Da die Anzahl der Regeln mit zunehmender Anzahl an Eingangsgrößen exponentiell steigt, ist eine Entscheidungshierarchie für die Fuzzy-Logik aufgebaut worden. Diese bietet den großen Vorteil, die Anzahl an benötigten Regeln stark zu reduzieren. Zudem wird dadurch die Übersichtlichkeit über das System erhöht und Änderungen an dem System sind einfacher umzusetzen [Gül97].

In einem ersten Schritt sind für die Entscheidungshierarchie (siehe Abbildung 4.10) die Eingangsgrößen sinnvoll kategorisiert worden, damit diese dann auf den Zwischenstufen miteinander verknüpft werden können. Die Kategorisierung ist hierbei mit dem PA abgestimmt worden. In der Entscheidungshierarchie ist eine Zwischenstufe in das System eingeführt worden, welche aus den Faktoren Förderbereich, Fördereinheit und Förderprozess besteht sowie acht Ausschlusskriterien, um das abschließende Ergebnis zu verbessern. Der Faktor Förderbereich setzt sich aus den Eingangsparametern Horizontal und Vertikaler Transport zusammen. Der Faktor Fördereinheit wird durch die Kombination der Eingangsparameter Max. Gewicht und Max. Abmessungen erzeugt und der Faktor Förderprozess wird durch die Transporte pro Stunde bestimmt. Neben der Zwischenstufe mit den drei Faktoren, sind auf Basis des morphologischen Kastens noch acht Ausschlusskriterien definiert worden. Diese dienen dazu die Auswahl an möglichen Transportmittelarten, die nach Ablauf der eigentlichen Fuzzy-Logik über die Eingangsparameter und Zwischenstufen erfolgt ist, weiter zu verbessern. Beispielsweise stellt der Automatisierungsgrad eine entsprechendes Ausschlusskriterium dar. Über die normale Fuzzy-Logik würden prinzipiell auch Systeme vorgeschlagen werden, die z. B. nicht automatisiert sind. Wenn der Nutzer aber explizit nur automatisierte Systeme vorgeschlagen bekommen möchte, werden nach der eigentlichen Fuzzy-Logik alle Transportmittelarten rausgefiltert, die nicht dieses Kriterium erfüllen.

Die Anzahl an Regeln konnte durch die Entscheidungshierarchie und die Ausschlusskriterien signifikant gesenkt werden. Unter Umständen könnten weitere Regeln gestrichen werden, wenn nach der Einschätzung eines Experten Definitionslücken zulässig sind. Zusätzlich zu den Definitionslücken könnten unvollständige Kombinationen bestimmt werden, die zu einer bestimmten Ausgangsgröße führen. Wenn beispielsweise die Kombination von zwei Eingangsgrößen zur Ausgangsgröße mittlere Auswahl führt und eine Auf- oder Abwertung durch eine weitere Eingangsgröße nicht möglich ist, kann diese auch unberücksichtigt bleiben und weitere Regeln eingespart werden.

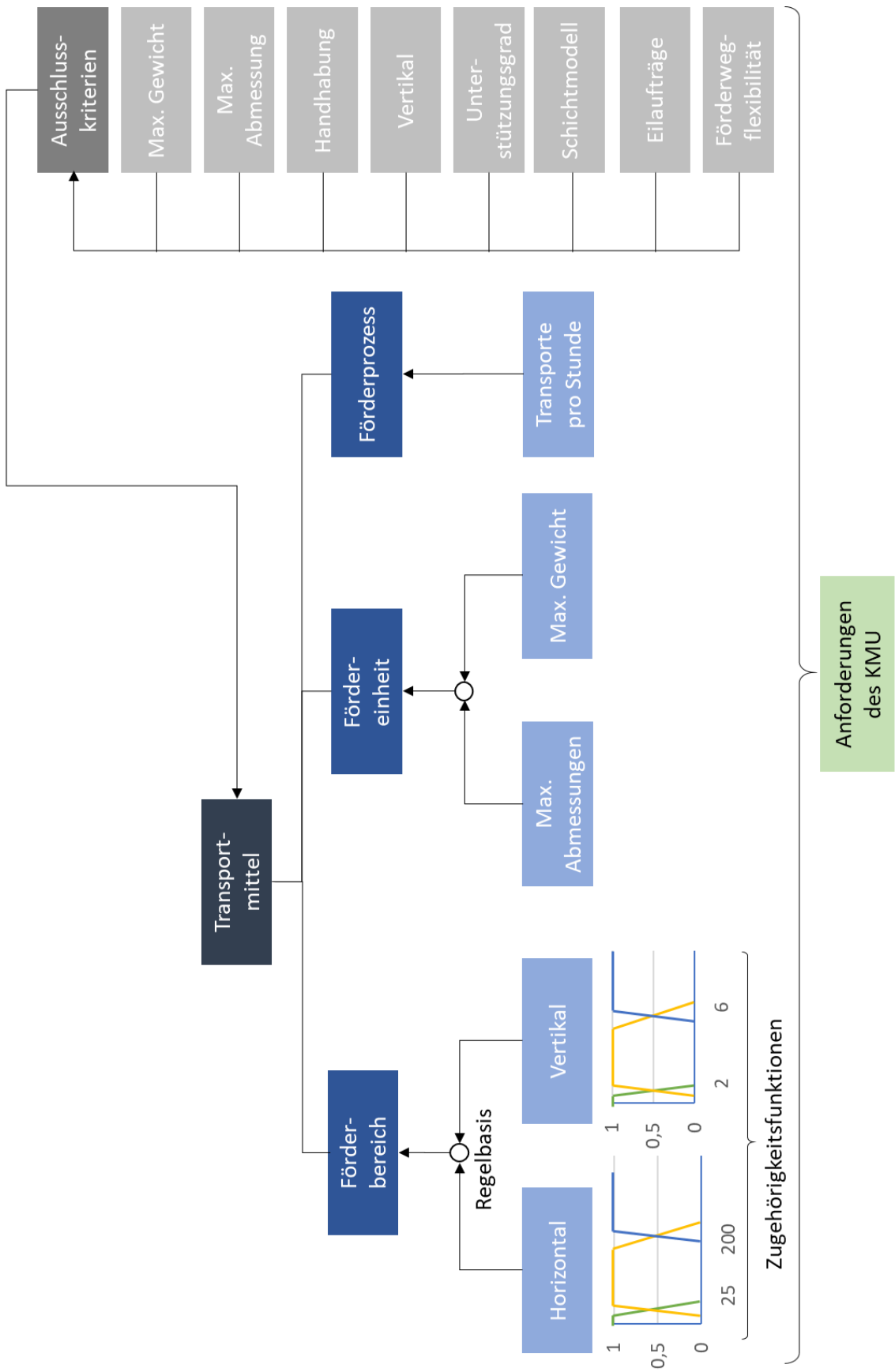


Abbildung 4.10: Entscheidungshierarchie Fuzzy-Logik

4.2.2.3. Regelbasis für die Zwischenstufe

Zusätzlich zu der Regalbasis, die die Eingangsparameter miteinander verbindet, musste eine Regelbasis implementiert werden, die die einzelnen Merkmalsausprägungen der Faktoren der Zwischenstufe miteinander verbindet und auf geeignete Transportmittelarten schließen lässt. In Abbildung 4.11 ist ein Auszug aus der Regelbasis für die Zwischenstufe der Fuzzy-Logik dargestellt. Die gesamte Regelbasis für die Zwischenstufe ist dem Anhang zu entnehmen (siehe Abschnitt 13.6)

WENN				DANN					
Förderbereich	Fördereinheit	Förderprozess	Vierrad Gabelstapler	Schubmaststapler	Handgabelhubwagen	Handwagen	Lasttragende fahrerlose Transportsysteme (bis 50kg)	Lasttragende fahrerlose Transportsysteme (500 kg)	Lasttragende fahrerlose Transportsysteme (über 1500kg)
-	-	-	-	+	++	++	0	-	-
-	-	-	-	+	++	++	+	0	-
-	-	0	-	+	0	+	+	0	-
-	-	+	-	0	-	-	++	0	-
-	-	-	0	+	++	+	-	0	-
-	-	-	+	+	++	+	0	0	0
-	-	0	0	+	0	0	+	+	0
-	-	+	0	+	-	-	+	++	+
-	0	-	+	+	++	-	/	0	0
-	0	-	+	+	+	-	/	+	+
-	0	0	0	+	0	-	/	+	+
-	0	+	-	0	-	-	/	++	++
-	+	-	+	/	/	/	/	/	/
-	+	-	++	/	/	/	/	/	/
-	+	0	+	/	/	/	/	/	/
-	+	+	0	/	/	/	/	/	/
-	++	-	++	/	/	/	/	/	/
-	++	-	++	/	/	/	/	/	/
-	++	0	++	/	/	/	/	/	/
-	++	+	+	/	/	/	/	/	/

Abbildung 4.11: Regelbasis für Zwischenstufe der Fuzzy-Logik

4.3. Aufbau und Implementierung des Expertensystems

In diesem Abschnitt und den darauffolgenden Unterkapiteln wird sowohl der konzeptionelle Aufbau des Expertensystems beschrieben sowie die anschließende Implementierung und Validierung (AP 4 und AP 5). Dieses Vorgehen wird gewählt, da die einzelnen Schritte stark ineinandergreifen und auf diese Weise der Aufbau sowie die Implementierung gemeinsam erläutert werden kann. Dabei wird zuerst auf die Implementierung des Expertensystems zur Transportmittelauswahl eingegangen, welche bereits auf den Ergebnissen der vorherigen Abschnitte aufbaut und anschließend der Aufbau und die Implementierung für die Layout- und Transportnetzplanung erläutert.

In **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** ist der konzeptionelle Aufbau für das entwickelte System dargestellt. Das System wird über einen Cloud-Server gehostet, über welche sowohl die Hauptdomain <https://autolat.de/> gehostet wird sowie die Subdomain zur Transportmittelauswahl <https://transportsystemauswahl.autolat.de/> und zur Layout- und Transportnetzplanung <https://fabrikplanung.autolat.de/>.

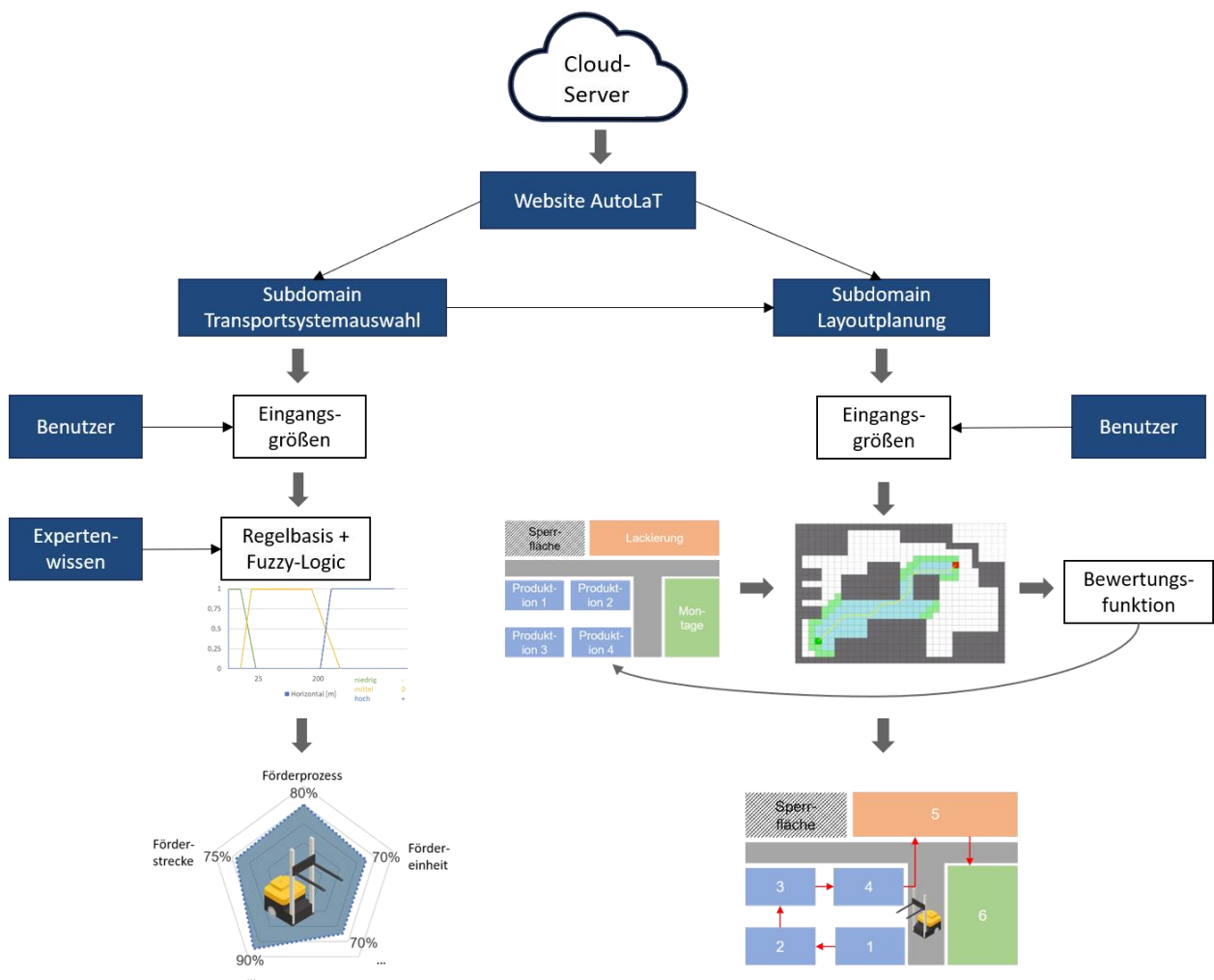


Abbildung 4.12: Konzeptioneller Aufbau des Systems

Für die Implementierung des Softwaredemonstrators auf einem Cloudserver sowie dem Bereitstellen über mehrere Websites wurde sich aufgrund folgender Sachverhalte entschieden:

- Die Anwender müssen die Software nicht auf lokalen Rechner installieren, um Probleme mit der internen IT zu vermeiden
- Jeder Nutzer hat von überall einen einfachen Zugriff auf das System
- Updates für das System können an einer zentralen Stelle ausgerollt werden und stehen anschließend allen Nutzern direkt zur Verfügung

Die Transportmittelauswahl läuft anschließend wie folgt ab: Der Nutzer trägt auf der Website seine Anforderungen an die Transportmittelauswahl ein. Die Eingabedaten basieren auf dem morphologischen Kasten zur Transportmittelauswahl (siehe Abbildung 4.6). Anschließend werden die Eingabedaten über die Regelbasis (siehe Abschnitt 4.2.2) und die Fuzzy-Logik (siehe Abschnitt 4.2.1) verarbeitet. Auf Basis dessen erhält der Nutzer abschließend eine Auswahl an möglichen Transportmittelarten. Hierbei ist darauf hinzuweisen, dass der Katalog an Transportmittelarten aktuell 10 Systeme umfasst und dementsprechend nur ein Teil der Anwendungsfälle abgebildet werden kann. Das Ergebnis aus der Transportmittelauswahl kann der Nutzer anschließend in Layout- und Transportnetzplanung weiter nutzen.

Die Layout- und Transportnetzplanung kann anschließend an die Transportmittelauswahl durchgeführt werden oder losgelöst davon. Es wurde sich für die unabhängige Nutzbarkeit der beiden Teilsysteme entschieden, da der Anwender nicht immer eine kombinierte Durchführung der Transportmittelauswahl und der Layout- und Transportnetzplanung benötigt.

In der Layout- und Transportnetzplanung werden wieder zuerst die Eingangsgrößen (z. B. die Abmessungen der zu beplanenden Fläche, die Anzahl und Abmessungen der einzuplanenden Flächen) bestimmt. Darauf aufbauend wird die Layoutplanung (siehe Abschnitt 4.3.2.1) und die Transportnetzplanung (siehe Abschnitt 4.3.2.2 und Abschnitt 4.3.2.3) durchgeführt. Das daraus resultierende Ergebnis wird anhand einer Bewertungsfunktion bewertet und iterativ über mehrere Durchläufe, mittels verschiedener Heuristiken, optimiert. Nach Abschluss der Optimierung wird dem Nutzer das fertige Layout bereitgestellt. Dieser hat abschließend noch die Möglichkeit das Layout nach seinen Wünschen weiter anzupassen oder einen weiteren Optimierungsdurchlauf zu starten.

In den nächsten Abschnitten wird sowohl das System zur Transportmittelauswahl sowie das zur Layout- und Transportnetzplanung tiefergehend vorgestellt.

4.3.1. Expertensystems zur Transportmittelauswahl

Der Softwaredemonstrator zur Transportmittelauswahl baut auf den Informationen des morphologischen Kastens sowie der zuvor entwickelten Fuzzy-Logik und des Expertenwissens zur Transportmittelauswahl, welches durch die Regelbasis dargestellt wird auf. Eine zusätzliche monetäre Bewertung wie sie im Antrag aufgeführt wurde, konnte nicht umgesetzt werden, da hierzu leider keine Daten erhoben bzw. von Industriepartner nicht bereitgestellt werden konnten. In Abbildung 4.13 ist die Nutzereingabe zur Transportmittelauswahl in dem Softwaredemonstrator dargestellt. Die einzelnen Felder resultieren einerseits aus den Auswahlkriterien im morphologischen Kasten und andererseits aus den Ausschlusskriterien der Entscheidungshierarchie. Der Nutzer kann hier seine Anforderungen an das Transportmittel eintragen. Anschließend erfolgt eine interne Zuordnung der Eingabedaten zu den hinterlegten Fuzzy-Sets, welche über die Zugehörigkeitsfunktionen der Fuzzy-Logik abgebildet werden.

Über die Regelbasis für die Eingangsparameter und die Zwischenstufe wird anschließend mittels der Fuzzy-Logik der Erfüllungsgrad für die einzelnen Transportmittelarten berechnet. Nach

Fertigstellung der Berechnung werden dem Nutzer auf der Ergebnisseite die geeigneten Transportmittelarten präsentiert (siehe Abbildung 4.14). Der Nutzer hat abschließend die Möglichkeit über ein Feedbackfenster mitzuteilen, ob er mit der Auswahl konform geht oder auf Basis der Eingangsdaten eher eine andere Transportmittelart ausgewählt hätte.

IPH AutoLaT Logout

Input

Horizontaler Transport (in m)* <input type="text" value="150"/>	Vertikaler Transport (in mm)* <input type="text" value="125"/>
Max. Abmessung der Fördereinheit in x-Richtung (in mm)* <input type="text" value="600"/>	Max. Abmessung der Fördereinheit in y-Richtung (in mm)* <input type="text" value="800"/>
Max. Gewicht (in kg)* <input type="text" value="50"/>	
Transporte pro Stunde* <input type="text" value="10"/>	
Förderwegflexibilität (1 bis 4)* <input type="range" value="1"/>	
Ausschlusskriterien	
<input type="checkbox"/> Förderhilfsmittel sind nicht unterfahrbar.	<input checked="" type="radio"/> keine Angabe
<input type="checkbox"/> Das Transportsystem soll automatisiert sein.	<input type="radio"/> 1-Schicht
<input type="checkbox"/> Es müssen Eilaufträge bearbeitet werden.	<input type="radio"/> 2-Schicht
	<input type="radio"/> 3-Schicht
<input type="button" value="Senden"/>	
* Pflichtfelder	

Abbildung 4.13: Nutzereingabe Transportmittelauswahl

Ergebnis

Unsere Empfehlung: Schubmaststapler



[Radar Chart](#)

[Tabellarische Übersicht](#)

Stimmen Sie mit der Empfehlung überein?

Helfen Sie uns dabei, das Auswahlssystem zu verbessern. Wir freuen uns über Ihr Feedback!

Abbildung 4.14: Ergebnis Transportmittelauswahl

4.3.2. System zur Layout- und Transportnetzplanung

In diesem Abschnitt wird der grundsätzliche Aufbau der Layout- und Transportnetzplanung erläutert. In Abbildung 4.15 ist der konzeptionelle Aufbau des Systems dargestellt, unterteilt nach der benötigten Datenbasis für den jeweiligen Prozessschritt, dem internen Prozessablauf, einer kurzen Visualisierung der einzelnen Prozessschritte sowie den zugrundeliegenden mathematischen Modellen. Im ersten Schritt der Groblayoutplanung werden insbesondere die Objektdaten von den verschiedenen Fabrikobjekten benötigt sowie die internen Materialflussbeziehungen, um eine effiziente Anordnung der einzelnen Bereiche zu ermöglichen. Zur Lösung des Layoutproblems ist ein mathematisches Modell auf Basis des Facility Layout Problems entworfen und gelöst worden (siehe Abschnitt 4.3.2.1).

Auf Basis dessen erfolgt die Auslegung des Transportnetzes innerhalb des Layouts. Hierzu ist ein Ansatz basierend auf der Graphentheorie genutzt worden, in dem eine große Anzahl an Knoten und Kanten innerhalb des Layouts zu einem Wegenetz zusammengesetzt werden (siehe Abschnitt 4.3.2.2). Als Datenbasis werden hier ebenfalls die Materialflussbeziehungen benötigt, um die benötigten Verbindungen zu identifizieren sowie die eingesetzten Transportmittel zur Auslegung der Wegbreite.

Abschließend wird die Routenplanung für die einzelnen Transportmittel auf Basis von Wegfindungsalgorithmen auf dem berechneten Wegenetz durchgeführt (siehe Abschnitt 4.3.2.3).

Hierfür werden die Materialflussbeziehungen und die für den Transport eingesetzten Transportmittel benötigt. Die den nachfolgenden Abschnitten werden die einzelnen Teilbereiche genauer erläutert.

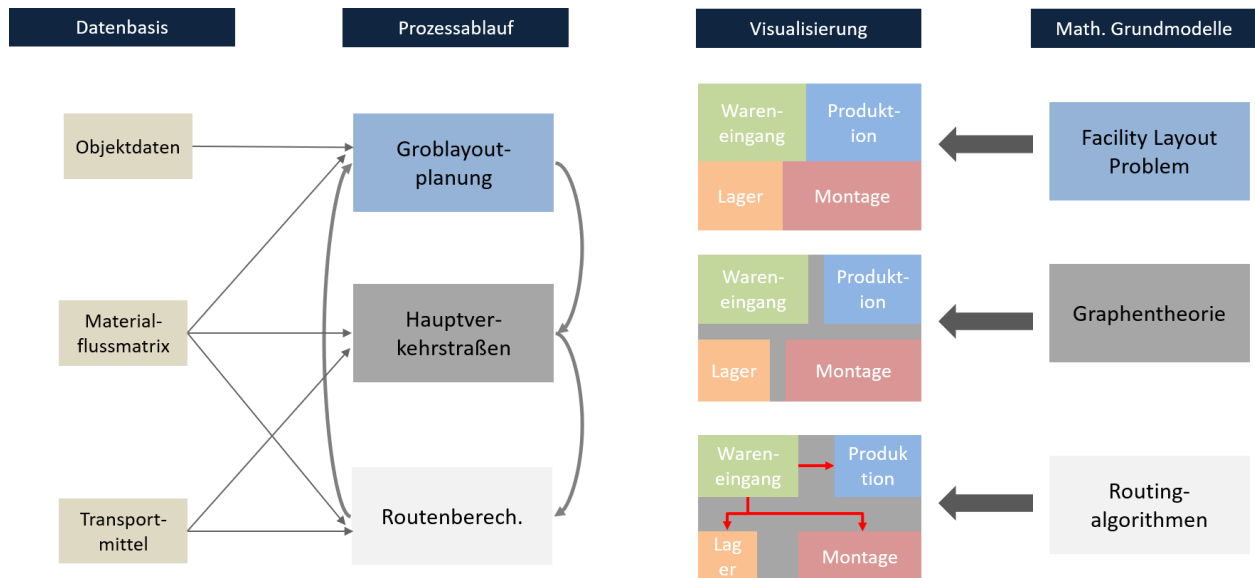


Abbildung 4.15: Konzeptioneller Aufbau der Layout- und Transportnetzplanung

4.3.2.1. Mathematisches Modell zur Layoutplanung

In diesem Abschnitt wird zu Beginn eine kurze Erläuterung zu der Problemklasse des Modells vorgenommen, anschließend erfolgt die Darstellung der benötigten Datengrundlage, der getroffenen Annahmen für das Modell sowie die Erläuterung des internen Prozessablaufs. Die eigentliche mathematische Formulierung des Modells ist dem Anhang angehängt (siehe Abschnitt 13.7).

Bei dem mathematischen Optimierungsmodell handelt es sich um ein diskretes, statisches, eingeschossiges FLP, das als nichtlineares, deterministisches MIP formuliert ist. Die Diskretisierung orientiert sich an einem Rasterkoordinatensystem mit Einheitsquadraten als Elemente, die eine vorgegebene Seitenlänge aufweisen. Beispielhaft wird in Abbildung 4.16 die Diskretisierung einer Planungsfläche für das Groblayout dargestellt. Zunächst wird auf der Stufe der Konzeptplanung eine realisierbare Anordnung der Bereiche oder Abteilungen gemeinsam mit den Hauptverkehrswegen vorgenommen.

Das Optimierungsmodell kann für den spezifischen Planungsfall durch Wahl der Parameter und aktiven Restriktionen ausgerichtet werden. Daher eignet es sich sowohl für die Neuplanung, bei dem äußere Faktoren selten vordefiniert sind, als auch für Erweiterung und Reorganisation mit weniger Freiheitsgraden durch bestehende Fabrikstrukturen. Eine Ergänzung und Erweiterung des Modells mithilfe zusätzlicher Restriktionen, die sich im Modellrahmen bewegen und keine Annahmen verletzen, bietet eine Lösung für individualisierte Fabrikplanung. Es wird angenommen, dass der letztendliche Anwender des mathematischen Entscheidungsmodells bereits eine recht klare Vorstellung davon hat, welche Fördermittel sich für spezifische Aufgaben eignen. Aufgabe ist nun, daraus die notwendigen Informationen und Restriktionen zu ziehen, die sich auf die Layoutgestaltung in all ihren Ebenen auswirken.

Grob: 6x6 Zellen

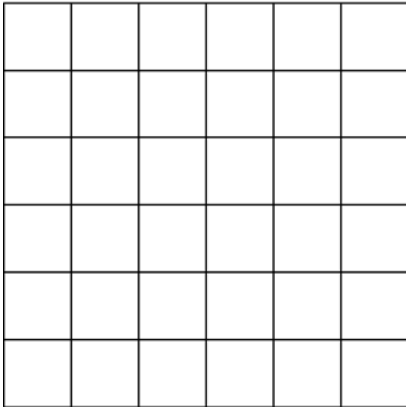


Abbildung 4.16: Gitternetzstruktur zur Diskretisierung der beplanbaren Fläche

Als **Datengrundlage** sind von Seiten der Fabrikplaner einige Größen im Voraus zu ermitteln oder anzunehmen bzw. Entscheidungen zu treffen:

- Die Entscheidung über das jeweils verwendete Transportmittel für die jeweilige Transportaufgabe ist in einem ausgelagerten Schritt bereits getroffen, für den aggregierten Transport zwischen Abteilungen im Groblayout ist jeweils das Transportmittel mit der größten erforderlichen Arbeitsgangbreite aller zugehörigen Transporte (und Transportmittel) prägend; gleichzeitig ist eine Aufspaltung des Transportes in unterschiedliche Fördervorgänge mit jeweils eigenen Fördermitteln möglich, etwa für den abteilungsübergreifenden, aggregierten Transport mit Stapler oder Schlepper, für den abteilungsinternen Transport mit FTF oder Hubwagen für kleinere Lose
- Im Falle einer Reorganisation oder Erweiterung sind bestehende Gebäudeelemente und -technik sowie Transportmittel zu berücksichtigen und zu lokalisieren; räumliche Strukturen (Wände, Säulen, Deckenhöhe etc.) sind unveränderbar
- Die Kostensätze für den Transport einer Mengeneinheit über eine Distanzeinheit durch ein bestimmtes Transportmittel sind ebenso bekannt wie die Fixkosten für das Verschieben von Abteilungen und die variablen Kostensätze, die mit der Erbauung und Nutzung der Transportwege einhergehen
- Unabhängig von Neu- oder Restrukturierung ist für die Groblayoutplanung eine Gebäudehülle anzugeben bzw. anzunehmen
- Die Seitenlänge der Einheitsquadrate ist entsprechend der geforderten Feinheit des Layoutmodells festzulegen; die Fabrikfläche muss in eine ganze Zahl an Einheitszellen diskretisierbar sein

Außerdem werden zur vereinfachten Modellierung einige **Annahmen** getroffen, die den komplexen Realfall einer integrierten Layoutplanung mathematisch abbildbar machen. Das entwickelte Modell soll dabei eine möglichst hohe Allgemeingültigkeit aufweisen, um für viele Problemstellungen einsetzbar zu sein:

- Die umgebende Halle wird als rechteckig modelliert; einerseits finden sich in der Realität überwiegend rechteckige Produktionshallen; des Weiteren können vorhandene Aussparungen über gesperrte Flächen zu Rechtecken aufgefüllt werden
- Die Form der betrachteten Abteilungen (Grobplanung) wird ebenfalls als rechteckig angenommen

- Die Materialhandhabungspunkte (Input und Output) befinden sich an den Abteilungsgrenzen, um für Transportmittel zugänglich zu sein
- Transportbeziehungen zwischen Abteilungen (Grobplanung) entsprechen den aggregierten Flüssen aller der jeweiligen Abteilung zugeordneten Maschinen; Flüsse innerhalb einer Zelle finden in der Grobplanung keine Berücksichtigung
- Der Zugang zu Maschinen einer anderen Abteilung ist nur über die festgelegten Input- und Outputpositionen der jeweiligen Abteilung möglich, sodass für abteilungsübergreifende Transporte Input und Output als Bezugspunkt gelten
- Die Wege verlaufen orthogonal; außerdem ist auf den Wegen ein bidirektionaler Transport erlaubt
- Zur Bewertung der erzeugten und realisierbaren Layoutalternativen werden ausschließlich zu minimierende Kosten betrachtet, qualitative Kriterien finden teilweise in den Nebenbedingungen Berücksichtigung
- Kosten, die mit dem Aufbau des Wegenetzes einhergehen, werden proportional zur Weglänge berücksichtigt; es gehen nur Wegstücke in die Betrachtung mit ein, die im Rahmen der Layoutoptimierung beeinflussbar sind, d. h. vorgegebene, permanente Wegelemente sind aus Kostensicht vernachlässigbar
- Alle für die jeweilige Planungsebene relevanten Objekte sollten über eine ganzzahlige Elementzahl darstellbar sein
- Auf Abteilungsebene sind je einem festen Randblock die Input- und Outputposition zugeordnet, sie können sich auch in einem Block überlagern; die Position ist variabel, d. h. Teil des Optimierungsproblems
- Die Transportdistanz zwischen Output und Input wird entlang der konstruierten Wege, d. h. nicht mit dem Euklidischen Abstand und nicht zwangsläufig mit dem Manhattan-Abstand (1-Norm), ermittelt; der Transport muss daher den Wegen folgen und darf nicht durch Wände, Maschinen oder gesperrte Bereiche führen
- Die Ausdehnung der Knotenpunkte im Wegenetz richtet sich nach der maximalen Breite aller ein- und ausgehenden Wege

Durch die Anwendung passender Lösungsverfahren wird schlussendlich ein materialflusseffizientes, unter den getroffenen Abstraktionen realisierbares Layout erstellt. Dieses ist durch die Koordinaten der einzelnen Elemente im gegebenen Raster, den Verlauf des Materialflusses sowie den dazugehörigen Kostenaufwand gekennzeichnet. Diese Ergebnisse werden sowohl quantitativ als auch grafisch aufbereitet dem Nutzer nach Eingabe der Datengrundlage zur Verfügung gestellt.

4.3.2.2. Graphennetz

Dem Zellgitter wird ein graphentheoretisches Netz aus einer Menge an Knoten und verbindenden Kanten (Bögen) überlagert. Die Anordnung der Knotenpunkte erfolgt nach klaren Kriterien. Zunächst ist jedem Input- und Outputelement der Abteilungen und Maschinen ein Knoten zugewiesen, der als Quelle und Senke des Materialflusses im Grob- bzw. Feinlayout fungiert. Zur Konstruktion der verbindenden Wege werden ebenso an relevanten Punkten Knoten platziert. Dies trifft auf Eckpunkte (Richtungsänderung) und Kreuzungen (drei oder mehr sich schneidende Wege) zu. Der Knoten wird mittig in der Elementarzelle positioniert und ist über die Lage des Elements im Zellraster eindeutig bestimmt (siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Aufgrund der Zuweisung der Knoten zu Stellen mit Richtungsänderungen oder Divergenz bzw. Konvergenz des Materialflusses, verlaufen die Kanten des Netzes orthogonal. Sie bewirken eine Änderung in einer Raumkoordinate, während die andere konstant bleibt. Einer Kante ist durch die Wahl der den Knoten zugewiesenen Indizes eine Richtung mitgegeben,

entsprechend dem gerichteten Transportfluss von einem zum anderen Betriebsmittel. Die Transportintensitäten eines Abteilungs- bzw. Maschinenpaares werden nicht kombiniert, sondern separat betrachtet. Jeder Transportvorgang wird physisch in eine Folge von gerichteten Kanten als Segmente des Transportweges überführt, die ausgehend vom Outputknoten entlang des Knotennetzes bis zum vorgegebenen Inputknoten fortschreiten.

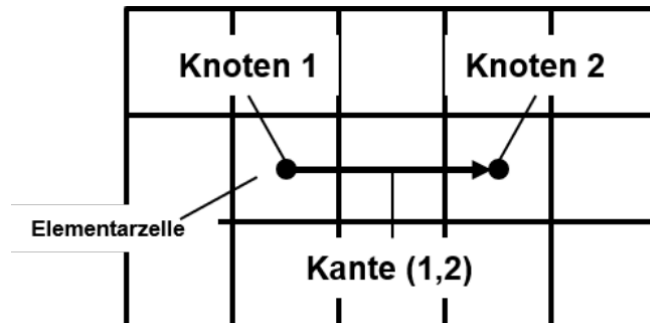


Abbildung 4.17: Überlagerter Netzwerkansatz

Als verbindendes Element zwischen der räumlichen Ebene aus Einheitsquadraten und dem darüber liegenden Netz werden aus den definierten Knoten und Kanten Wegelemente als Referenz für das im weiteren Modell finalisierte Wegesystem im Grob- und Feinlayout abgeleitet. Zur Messung der Distanz zwischen Input- und Outputknoten eines Flusses, wird die minimierende Kombination aneinandergereihter Kanten als Abschnitte des Transportweges bestimmt, die einen Pfad vom Output zum Input bildet. Zu diesem Zweck existieren unterschiedliche Algorithmen, etwa der Dijkstra- oder der A*-Algorithmus (siehe Abschnitt 4.3.2.3), die auf dem Breadth-First-Search-Verfahren zur Pfadgenerierung beruhen. Durch die Distanzmessung entlang des Gangnetzes wird zusätzlich die Schwäche des Manhattan-Abstands umgangen, trotz blockierender Elemente, durch die kein Transport möglich ist, den Abstand rechtwinklig festzulegen. Alle Elementarzellen, durch die Kanten verlaufen, denen eine Flussintensität zugewiesen ist (die daher aktiv sind), sind als Wegelemente zu kennzeichnen.

4.3.2.3. Routenberechnung mittels A*-Algorithmus

Um in einem Graphen den Weg mit den geringsten Wegkosten von einem Startknoten zu einem Zielknoten zu ermitteln, wurden bereits zahlreiche Algorithmen entwickelt. Der Fokus in diesem Unterkapitel liegt auf dem A*-Algorithmus, der für die Wegesuche ausgewählt wurde. Der A*-Algorithmus ermittelt in einem gerichteten, positiv gewichteten Graphen den kürzesten Weg von einem Startknoten zu einem Zielknoten, dabei werden unter Anwendung einer Heuristik diejenigen Knoten zuerst durchsucht, die (wahrscheinlich) schnell zum Ziel führen.

Funktionsweise:

Dem Algorithmus werden als Eingangsgrößen der Graph mit den Knoten und den Kanten zwischen allen Knoten mitgeteilt, außerdem erfolgt eine Angabe des Startknotens und des Zielknotens. Der Algorithmus untersucht zuerst solche Knoten, die zu den vermeintlich geringsten Gesamtwegkosten führen. Diese vermeintlichen Gesamtwegkosten werden den Knoten über eine Funktion f zugewiesen. Die f -Kosten setzen sich zusammen aus den geringsten (bisher bekannten) Kosten g , die vom Start bis zum untersuchten Knoten entstehen und einem heuristischen Wert h , mit dem die noch ausstehenden Kosten vom Knoten bis zum Ziel abgeschätzt werden, vgl. [Tur09].

Der Algorithmus arbeitet mit einer OPEN-Liste und einer CLOSED-Liste. Die OPEN-Liste enthält die Knoten, zu denen bereits ein (möglicherweise suboptimaler) Weg bekannt ist. Die CLOSED-Liste enthält solche Knoten, zu denen bereits der Weg mit den geringsten Kosten bekannt ist. Im ersten Durchlauf wird der Startknoten zur OPEN-Liste hinzugefügt. In einer Schleife wird nun in jeder Iteration von der OPEN-Liste der Knoten mit den geringsten f -Kosten ausgewählt und daraufhin überprüft, ob es sich bereits um den Zielknoten handelt, in diesem Fall ist der günstigste Weg gefunden und der Algorithmus endet. Handelt es sich noch nicht um den Zielknoten, wird der Knoten in die CLOSED-Liste verschoben und alle seine Nachbarknoten werden folgendermaßen abgearbeitet.

- Befindet sich der Nachbarknoten noch nicht in der OPEN-Liste, wurde er noch nicht untersucht. Er wird der OPEN-Liste hinzugefügt und seine f -Kosten werden aktualisiert.
- Befindet sich der Nachbarknoten bereits auf der OPEN-Liste, wurde der Knoten bereits entdeckt und seine Schätzkosten wurden bereits mindestens einmal ermittelt. Nun wird festgestellt, ob es sich beim aktuellen Weg um einen günstigeren Weg handelt. Falls dies der Fall ist, werden die g -Kosten (und damit auch die f -Kosten) des Knotens aktualisiert.
- Befindet Sie sich der Nachbarknoten bereits in der CLOSED-Liste (d. h. er wurde bereits abgearbeitet) oder ist nicht begehbar, wird er ignoriert und es wird zum nächsten Knoten übergegangen.

Nun wird wieder der Knoten mit den geringsten Schätzkosten von der OPEN-Liste ausgewählt usw. Wurden schließlich alle Knoten in die CLOSED-Liste verschoben, ohne zuvor den Zielknoten zu identifizieren, existiert kein Weg vom Start zum Ziel und der Algorithmus endet. Jeder besuchte Knoten besitzt einen Zeiger auf seinen Vorgängerknoten. Durch das Verbinden aller Vorgängerknoten des Zielknotens wird der günstigste Weg generiert.

Manhattan-Abstand

Der Manhattan-Abstand (L_1) entspricht der Länge der kürzesten Verbindung zwischen Start und Ziel in einem quadratischen Gitter, welches Bewegungen in vier Richtungen (Vielfache von 90°) zulässt, siehe auch Abbildung 4.18. Der Manhattan-Abstand L_1 zwischen zwei Punkten a und b wird definiert als Summe der absoluten Differenzen in Richtung der x - bzw. y -Achse.

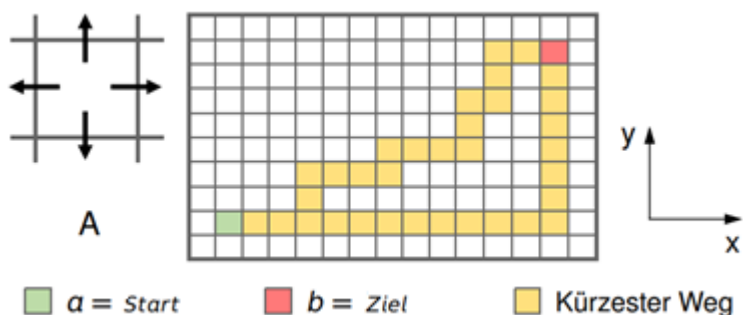


Abbildung 4.18: Kürzester Weg mit vier zulässigen Bewegungsrichtungen

Aus Abbildung 4.18 wird ersichtlich, wie sich der Manhattan-Abstand zwischen Start und Zielknoten zusammensetzt: Zwölf Schritte in positive x -Richtung und sieben in positive y -Richtung.

Solange jede Bewegung die Entfernung zum Ziel reduziert, ist es irrelevant, wie viele Richtungswechsel der Weg aufweist und an welcher Stelle diese stattfinden. Es gibt daher meist

mehrere Wegvarianten, die vom Startknoten zum Zielknoten führen und den gleichen Manhattan-Abstand besitzen.

4.3.3. Softwaredemonstrator Layout- und Transportnetzplanung

Die in den Abschnitten zuvor erläuterten Sachverhalte sind anschließend als Gesamtsystem zur Layout- und Transportnetzplanung implementiert worden. Der Nutzer kann sich über die Website anmelden und klickt anschließend auf den Button Blank Layout. Hier findet der Nutzer die Basisoberfläche vor. Über diese kann er sich in einem ersten Schritt eine Exceldatei herunterladen, die die drei Reiter Fabrik, Bereiche und Kumulierten Materialflussmatrix umfasst. Im Reiter Fabrik kann der Nutzer die Grundfläche der zu beplanenden Fläche angeben und im Reiter Bereiche die verschiedenen Bereiche und deren Abmaße angeben. Abschließend werden im Reiter Kumulierte Materialflussmatrix die Materialflussbeziehungen zwischen den einzelnen Bereichen angegeben.

Nachdem die Daten eingetragen worden sind, wird die Exceldatei vom Nutzer wieder hochgeladen und die einzuplanenden Bereiche erscheinen im Userinterface. Anschließend muss das Layout mit einem entsprechenden Namen versehen und abgespeichert werden. Das Layout muss anschließend geschlossen werden, damit die Daten in die Datenbank überführt werden und anschließend einmal wieder geöffnet werden. Der Nutzer findet nun oben links den Button Start Optimization. Hierüber öffnet sich ein Dialogfenster, in das der Nutzer einen Namen für den Optimierungsdurchlauf einträgt, sowie die Wegbreite für das Wegenetz festlegen muss. Die weiteren Daten in dem Dialogfenster können vom Nutzer so übernommen werden. Anschließend kann der Optimierungsprozess gestartet werden.

Die Ergebnisse aus den Optimierungsdurchläufen kann der Nutzer anschließend über den Analyse-Button aufrufen. Die Darstellung eines Ergebnislayouts sowie ein Auszug aus dem Userinterface ist in Abbildung 4.19 dargestellt. Der Nutzer hat abschließend die Möglichkeit weitere Bereiche, Maschinen und Wege hinzuzufügen und das Ergebnis nach seinen Wünschen weiteranzupassen.

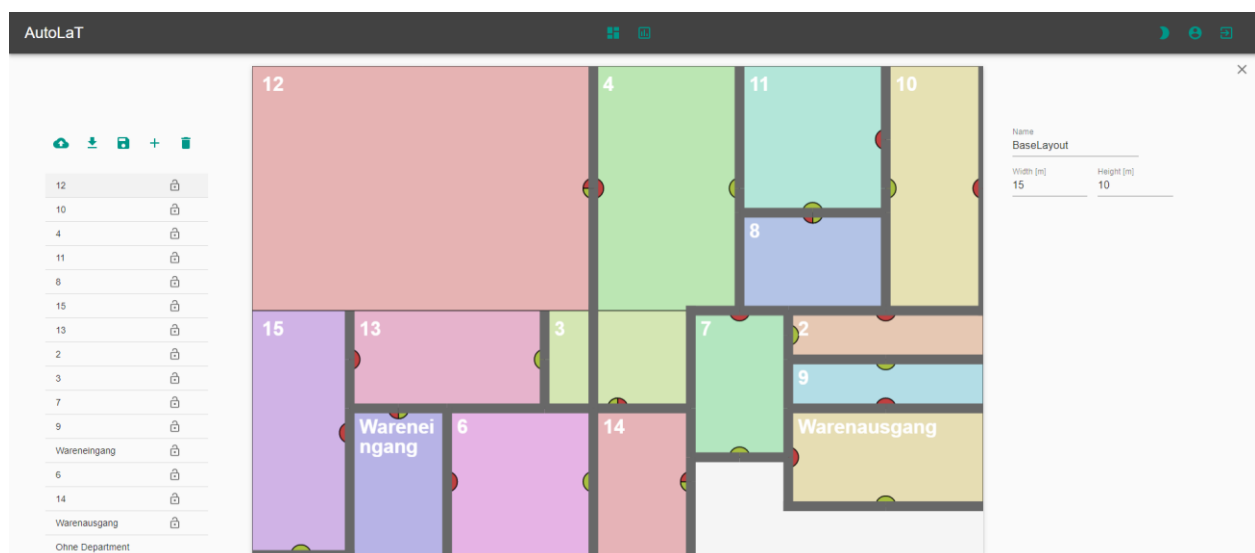


Abbildung 4.19: Softwaredemonstrator Layout- und Transportnetzplanung

4.4. Validierung

Für die Validierung der einzelnen Teilabschnitte, wie z. B. dem morphologischen Kasten zur Transportmittelauswahl, sowie dem Softwaredemonstrator sind einerseits diverse Experteninterviews durchgeführt worden und andererseits verschiedenen Fälle zur Transportmittelauswahl und Layoutplanung durch den PA über den Softwaredemonstrator abgebildet worden. Die Aufnahme des Expertenwissens basierte auf Erfahrungswissen und dauerte je nach Diskussionspartner mehrere Stunden. Nach Rückmeldungen der Projektpartner ist der Softwaredemonstrator auch von Personal anwendbar, die keinen großen Erfahrungsschatz in den Bereichen der Transportmittelauswahl, Layout- oder Transportnetzplanung haben. Die Güte der Entscheidung bei der Transportmittelauswahl kann zudem zukünftig verbessert werden, in dem die Datenbasis an Transportmitteln in dem System deutlich erhöht wird sowie die Regelbasis über das Feedback von weiteren Auswahldurchläufen verbessert wird. Einige Schwächen des Softwaredemonstrators wurden ebenfalls identifiziert. Mögliche Lösungsansätze konnten anschließend erarbeitet und programmiert werden. Bspw. sollte die nachträgliche Bearbeitung des Layouts möglich sein. Zudem ist die Validierung des zugrundeliegenden mathematischen Modells zur Layoutplanung erfolgt, welche im nächsten Abschnitt erläutert wird.

4.4.1. Validierung der Layoutplanung

Alle Berechnungen und Optimierungen sind auf demselben Computer durchgeführt worden, daher sind dessen technische Daten als Bezugspunkt für zukünftige Ergebnisse und Vergleichswerte zu sehen. Der PC läuft auf einem 64-Bit-Windows 10-Betriebssystem und besitzt einen AMD Ryzen 7 2700X 8-Kern-Prozessor (16 logische Prozessoren) mit 3,7 GHz Taktfrequenz und 64 GB Arbeitsspeicher. Als Grafikkarte ist die NVIDIA GeForce GTX 1070, als SSD-Festplatte das Modell CT250MX500SSD1 mit fünf Partitionen integriert. Abweichend von den Standardeinstellungen des BARON-Solvers ist für alle Submodelle und Probleminstanzen mit veränderten Werten in der maximal erlaubten Verarbeitungszeit (neuer Wert: 200.000 Sekunden), relativem Abstand zum globalen Optimum (10 % bzw. 0,1) und Anzahl der verwendeten CPU-Kerne (5 physische Kerne) gearbeitet worden. Nach Ende der Optimierung findet eine Ausgabe ausgewählter Ausdrücke und Variablen in der Python-Konsole direkt statt. Außerdem werden im hinterlegten Systempfad Log- und Listing-Dateien gespeichert, die Informationen und Statistiken zum Optimierungsprozess, dem generierten Modell und der besten gefundenen Lösung (oder einem Abbruchgrund) beinhalten. Vorweg kann festgehalten werden, dass sich die anfängliche Fixierung einzelner (zulässiger) Variablenwerte in allen Fällen positiv auf die Berechnungsdauer auswirkt. Dies zeigt sich vordergründig bei der Vorabplatzierung der Abteilungen oder Maschinen, um darauf aufbauend das zugehörige Wegesystem bzw. Netzwerk auszubilden. So lassen sich früh ganze Zweige des Entscheidungsbaumes mit schlechterem Zielfunktionswert ausschließen und nur wenige Variablen verbleiben als entscheidungsrelevant.

Ergebnisse

Hinsichtlich der Modellgröße ist mit zunehmender Komplexität der Submodelle ein Anstieg der Gleichungs- und Variablenzahl zu beobachten (vgl. Abbildung 4.20). Dies trifft insbesondere auf den Übergang von der Bestimmung benachbarter Knotenpaare zur Generierung von Transportpfaden zu. Im Vergleich zu erstgenanntem Submodell wird die Zahl der gebildeten Restriktionen und Entscheidungsvariablen mehr als verdoppelt. Auch die Zahl nichtlinearer Ausdrücke nimmt für umfangreichere Subprobleme zu. Exemplarisch für den wachsenden Modellumfang und die damit einhergehende herausfordernde Lösbarkeit können die Zeitanteile

herangezogen werden, die für die Kompilierung, Modellgenerierung und letztlich Optimierung des Modells bzw. Ausführung des Solver Algorithmus benötigt werden (vgl. Abbildung 4.21). Für das kleinste Submodell werden 0,015 Sekunden für Modellkompilierung und 0,094 Sekunden für Modellgenerierung benötigt. Demgegenüber stehen 0,86 und 2,704 Sekunden für das Submodell zur Pfaderzeugung.

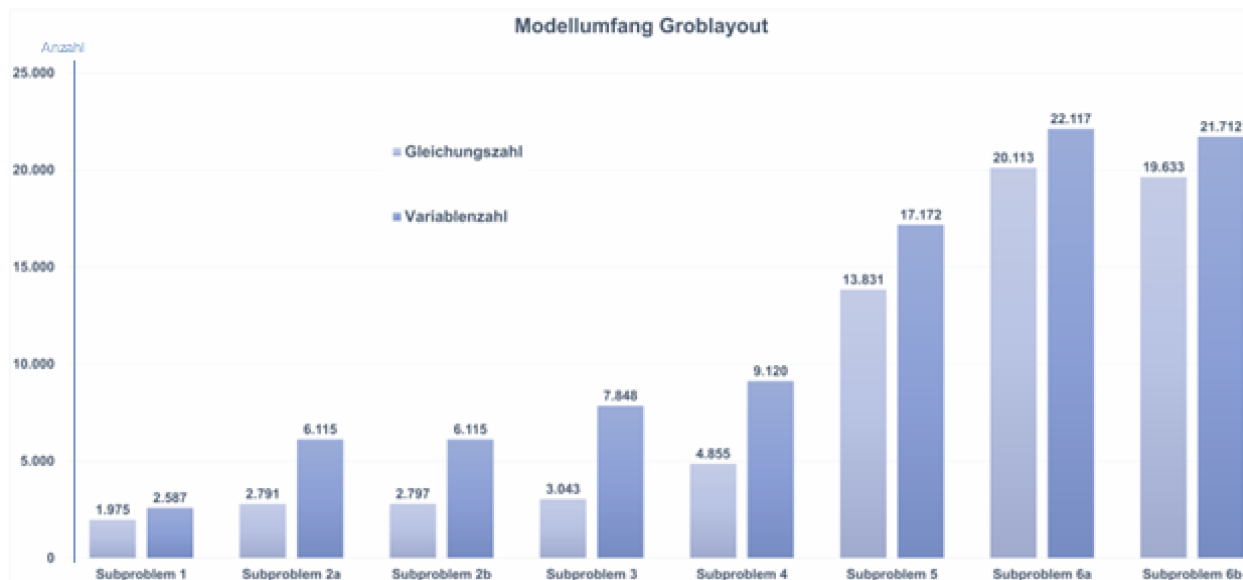


Abbildung 4.20: Entwicklung der Variablen- und Gleichungszahl für ausgewählte Subprobleme der Groblayoutplanung

Subproblem	1	2a	2b	3	4	5	6a	6b
Kompilierzeit [s]	0,02	0,05	0,05	0,06	0,78	0,86	2,27	17,78
Generierungszeit [s]	0,09	0,17	0,16	0,17	2,38	2,70	6,16	42,61
Optimierungszeit [s]	405,1	724,9	66,9	15,3	117,5	1.593,6	15.451,5	*

Abbildung 4.21: Rechenzeiten der Subprobleme zur Groblayoutplanung

Auch die Rechenzeit zur Modelloptimierung steigt in Relation zur Modellgröße sukzessive an. Hierbei ist jedoch zu berücksichtigen, dass in den unterschiedlichen Submodellen Teile der Variablen fixiert sind. Außerdem stellt die Berechnung einer Testinstanz keine universelle Referenz des allgemeinen Untermodells dar, vielmehr sind verschiedene Berechnungen für ein differenzierteres Bild und eine bessere Vergleichbarkeit erforderlich. Für alle untersuchten Submodelle konnte eine zulässige, optimale Lösung gefunden werden. Die Zielfunktionswerte lassen sich nur beschränkt vergleichen, da sich auf der einen Seite die übergeordnete Zielfunktion, auf der anderen Seite die begrenzenden Restriktionen zwischen den gebildeten Submodellen unterscheiden. Relevante Variablen werden nach erfolgreicher Optimierung ausgegeben, sodass das dazugehörige Layout gebildet werden kann. Der Zielfunktionswert für den Fall der reinen Abteilungsanordnung, ohne dass Wege erzeugt werden, setzt sich daher ausschließlich aus Transportkosten zusammen. Die Abteilungen grenzen direkt aneinander und Distanzen werden auf kürzestem Weg rechtwinklig berechnet. Für die beste Layoutvariante (siehe Abbildung 4.22) fallen Kosten in Höhe von 5.760 Geldeinheiten an.

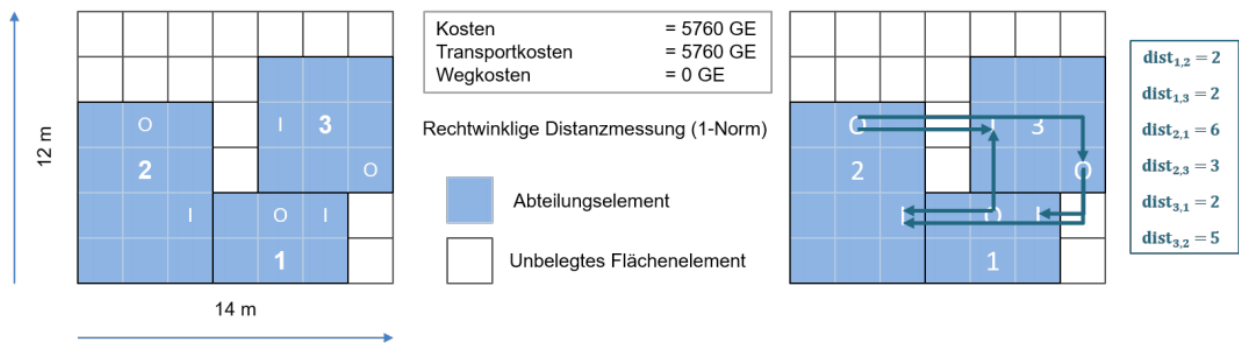


Abbildung 4.22: Groblayout Subproblem 1

Sobald alle Knotenarten für das Wegenetz erzeugt werden und die Wegevariablen eine Fixierung erfahren, sind größere Abstände zwischen den Abteilungen erforderlich. Die Kosten, die sich aus Transportkosten und Kosten für die Bildung eines Referenzwegelements zusammensetzen, steigen auf 9.874 Einheiten (siehe Abbildung 4.23). Die Kosten stellen nur einen fiktiven Wert zur Vergleichbarkeit der verschiedenen Lösungen dar. Vor allem die Transportkosten nehmen aufgrund erhöhter Transportdistanzen zu.

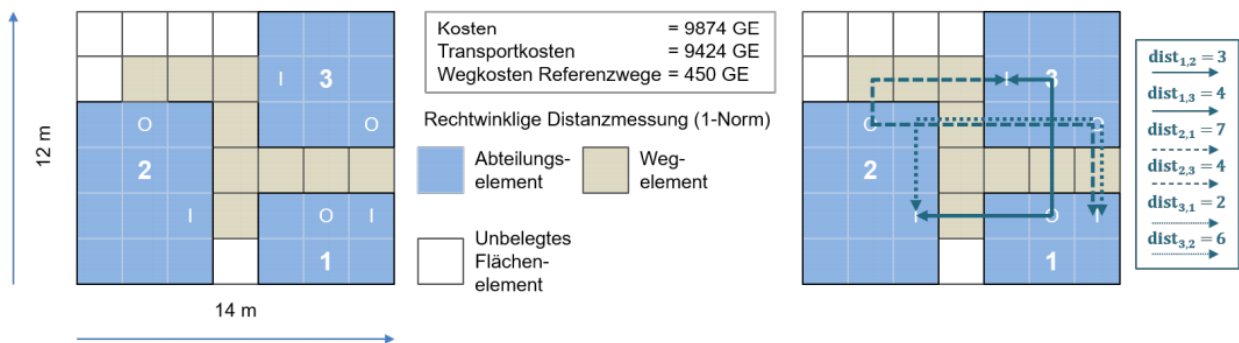


Abbildung 4.23: Groblayout Subproblem 3

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 Softwaredemonstrators und hilft damit bei der Verbreitung der Ergebnisse über den projektbegleitenden Ausschuss hinaus. Eine Auflistung der Veröffentlichungen sowie der Transfermaßnahmen ist in Kapitel 9 zu finden.

6. Verwendung der Zuwendung

- wissenschaftlich-technisches Personal (Einzelansatz A.1 des Finanzierungsplans)
 - 1 wissenschaftlicher Mitarbeiter (TV-L 13) mit besonderen Kenntnissen im Bereich Logistik/Automatisierung für 25 Monate
 - Techniker für 12 Monate
- Hilfskräfte (Einzelansatz A.3 des Finanzierungsplans)
 - Wissenschaftliche Hilfskräfte als Unterstützung bei der Projektbearbeitung für 24 Monate (10.885,71 €)

- Geräte (Einzelansatz B des Finanzierungsplans)
 - Keine Geräte angeschafft
- Leistungen Dritter (Einzelansatz C des Finanzierungsplans)
 - Keine Leistungen Dritter in Anspruch genommen

7. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die *Notwendigkeit* der geleisteten Arbeit begründet sich durch eine große Praxisrelevanz. Nach Gesprächen mit Unternehmen wurde deutlich, dass speziell KMU mit einer adäquaten Layoutplanung im Fabrikplanungsprozess sowie der integrierten Transportmittelauswahl überfordert sind und auf externe Berater zugehen oder die Entscheidung subjektiv treffen. Diese Forschungslücke schließt sich mit der erarbeiteten Methode. Da speziell bei der integrierten Betrachtung zwischen der Transportmittelauswahl und der darauf aufbauenden Layoutplanung ein neuer Forschungsbereich betreten wurde, waren eine detaillierte Bearbeitung und eine Vielzahl von Diskussionen mit Experten unabdingbar. Sowohl die Erstellung der morphologischen Kästen, unter anderem zur geeigneten Transportmittelauswahl, sowie die Betrachtung der Einflüsse von Transportmittel auf das Layout und der anschließende Aufbau einer geeigneten Fuzzy-Logik erfolgte über eine Vielzahl von Diskussionen mit unterschiedlichen Unternehmen, da bspw. die Anforderungen an die Transportmittelauswahl für verschiedenen Oberkategorien (z. B. Stetig- und Unstetigförderer) sehr unterschiedlich war bzw. anwendungsfallspezifisch ausfiel. Die *Angemessenheit* der einzelnen Arbeitsschritte ergibt sich aus der sachgemäßen Bearbeitung der Teilziele. Da als Ergebnis ein Softwaredemonstrator bereitgestellt wurde, welcher Unternehmen sowohl bei der Transportmittelauswahl als auch bei der anschließende Layoutplanung unterstützt und damit direkt in der Industrie angewandt wird, war die gründliche Bearbeitung und das Verwenden von wissenschaftlichen Methoden wichtig und für den Softwaredemonstrator ein grundlegender Faktor. Die Ergebnisse mussten somit auch in entsprechender Programmierform vorliegen. Die geleistete Arbeit entspricht dem begutachteten sowie bewilligten Antrag und war daher für die Durchführung des Vorhabens notwendig und angemessen.

8. Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen

Die Forschungsergebnisse liefern praxisorientierte Lösungen für die Unternehmen. Mit Hilfe des Auswahlsystems für Transportmittel basierend auf einer Fuzzy-Logik sowie der Layoutplanung können produzierende KMU, Logistikdienstleister sowie Fabrikplaner systematisch ein geeignetes Transportmittel aufwandsarm auswählen sowie eine anschließende Layoutplanung durchführen. Somit bekommen die genannten Adressaten Planungssicherheit bzgl. der Auswahl von Transportmitteln sowie bei der Durchführung einer effizienten Layoutplanung. Der im Forschungsvorhaben entwickelte Softwaredemonstrator operationalisiert die Ergebnisse und gewährleistet eine aufwandsarme Nutzung, ohne die Notwendigkeit zusätzlicher Entwicklungstätigkeiten oder Investitionen. Des Weiteren ist eine Weiterentwicklung bei der Transportmittelauswahl durch die Verwendung einer größeren Datenbasis bei den Transportmitteln möglich. Darüber hinaus kann die Layoutplanung durch die Implementierung eines höheren Detaillierungsgrads bis hin zum Feinlayout erweitert werden. Die Transfermaßnahmen fördern hierbei die Verbreitung und Nutzung der Ergebnisse. Dabei wurden insbesondere durch die Publikation der Ergebnisse in Fachzeitschriften sowie die Darstellung der Ergebnisse bei den PA-Treffen, ein großer Nutzerkreis adressiert. Dieser besteht aus

produzierenden Unternehmen verschiedener Branchen, die aufgrund von sich ändernden Rahmenbedingungen Transportmittel neu auswählen sowie eine entsprechende Layoutplanung vornehmen müssen. Auch Logistikdienstleister und Fabrikplaner, die Transportmittel beschaffen bzw. eine Layoutplanung durchführen, zählen zum potenziellen Nutzerkreis.

Durch die Zusammenarbeit mit dem Projektbegleitenden Ausschuss wurden erste Anwendungsmöglichkeiten direkt geschaffen und validiert. Für KMU entsteht unmittelbarer und mittelbarer Nutzen aus dem Forschungsvorhaben. Folgender **unmittelbarer Nutzen** ergibt sich durch die Umsetzung der Projektergebnisse:

- Produzierende KMU sowie Logistikdienstleister können mit Hilfe der entwickelten Transportmittelauswahl diese aufwandsarm und mit einer höheren Planungssicherheit durchführen. Somit wird langfristig die Wettbewerbsfähigkeit der in Deutschland ansässigen Unternehmen gesichert, indem das Anlagekapital optimal eingesetzt wird.
- Produzierende KMU sowie Fabrikplaner können die Ergebnisse des Forschungsvorhabens durch die Systematisierung der automatisierten Layoutplanung nutzen und diese entsprechend aufwandsarm und kosteneffizient durchführen. Durch die Bewertung werden Planungsergebnisse besser vergleichbar und die Objektivität steigt. Darüber hinaus ist die Qualität der Planungsergebnisse nicht mehr ausschließlich vom Erfahrungswissen eines Planers abhängig. Somit profitieren vor allem KMU von den Forschungsergebnissen, für die eine teure Fremdvergabe der Planung aufgrund fehlenden Kapitals nicht in Frage kommt.

Folgender **mittelbarer Nutzen** ergibt sich durch die Umsetzung der Ergebnisse:

- Für Hersteller von Transportmitteln kann eine schnellere Verbreitung von neuen Systemen, bei der Nutzung des Softwaredemonstrators, von Vorteil sein. Durch die Bereitstellung einer Wissensbasis mit spezifischen Transportmitteln haben KMU unmittelbaren Zugang zu neuartigen Systemen und können deren Vorteile aufwandsarm erkennen. Somit profitieren langfristig ebenfalls Hersteller von Transportmitteln von den Forschungsergebnissen.

9. Veröffentlichungen und Transfermaßnahmen

Erste Schritte zum Ergebnistransfer sind während der Projektlaufzeit durchgeführt worden. Weitere Maßnahmen zur Verwertung und Verbreitung der Projektergebnisse sind im Anschluss an das Projekt vorgesehen. Über den Austausch zwischen Forschungseinrichtungen und den Unternehmen des Projektbegleitenden Ausschusses 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, Logistikdienstleistern und Logistikberatungsunternehmen.

Die bereits durchgeführten und noch geplanten Transfermaßnahmen sind dem Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft in Tabelle 13 und 14 zu entnehmen.

Tabelle 13: Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft (spezifisch durchgeführte Transfermaßnahmen)

Maßnahme	Ziele	Rahmen	Zeitraum
Veröffentlichungen, Information der interessierten Öffentlichkeit	Information der interessierten Öffentlichkeit und Wissenstransfer in die Wirtschaft	Einrichtung einer Projekthomepage autolat.iph-hannover.de	12/2018
		Pressemitteilung zum Projektstart (Fabriklayout und Transportsystem in einem Schritt planen)	04.12.2018
		Veröffentlichung: Kutzner, C.; Stonis, M.; Nyhuis, P.: Konzept eines Expertensystems zur automatisierten Layout- und Transportmittelplanung. In: ZWF – Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, Carl Hanser Verlag, 114. Jg. (2019), H. 3, S. 91-95. DOI: 10.3139/104.112054	12/2019
		Veröffentlichung: Kutzner, C.: Fabrikplanung: Layout und Transportsystem gleichzeitig planen. In: phi – Produktionstechnik Hannover informiert, Newsletter Nr. 27 / Juni 2020, ISSN: 2198-1922.	06/2020
		Veröffentlichung: Kutzner C, Lucas F, Sönmez C, Stonis M, Nyhuis P (2020). Methode zur automatisierten Transportmittelauswahl mittels Fuzzy-Logik. Logistics Journal : referierte Veröffentlichungen, Vol. 2020.	12/2020
		Vorstellung des Projekts bei dem Kundentag der Willenbrock Fördertechnik GmbH	28.06.2019
		Pressemitteilung zum Projektende	Nach der Projektlaufzeit
Akademische Lehre und berufliche Weiterbildung	Qualifizierung von Studenten	Betreuung der Masterarbeit: Identifikation der Einflüsse von Transportsystemen auf die Layoutgestaltung unter der Berücksichtigung einer wirtschaftlichen Betrachtung; F. Lucas, Leibniz Universität Hannover	04/2019-10/2019
		Betreuung der Bachelorarbeit: Identifikation von Einflussgrößen innerbetrieblicher Transportsysteme auf das Fabriklayout; P. Stölting, Leibniz Universität Hannover	05/2019-08/2019
		Betreuung der Bachelorarbeit: Entwicklung und Implementierung einer Fuzzy Logic zur Auswahl von Transportsystemen; C. Sönmez, Leibniz Universität Hannover	05/2019-09/2019
		Betreuung der Studienarbeit: Automatisierte Transportnetzplanung: Ansätze zur Auslegung von Wegenetzen im	05/2019-08/2019

		Fabriklayout; M. Büttcher, Leibniz Universität Hannover	
		Betreuung der Studienarbeit: Anforderungsanalyse zur Grob- und Feinplanung; C. Pugner, Leibniz Universität Hannover	05/2019- 09/2019
		Betreuung der Masterarbeit: Transportnetzplanung - Analyse von Algorithmen zur Transportnetzplanung im Rahmen der Fabrikplanung; S. Kadatz. Leibniz Universität Hannover	04/2020- 09/2020
		Betreuung der Masterarbeit: Entwicklung eines mathematischen Optimierungsmodells zur materialflusseffizienten Grob- und Feinlayoutplanung unter Berücksichtigung der Einflüsse von Transportsystemen; P. Wenzel, Leibniz Universität Hannover	04/2020 10/2020
		Betreuung der Masterarbeit: Entwicklung und Implementierung eines Optimierungsmodells in Python zur materialflusseffizienten Layoutplanung in Abhängigkeit der Einflüsse von Transportsystemen; D. Numanovic, Leibniz Universität Hannover	04/2020- 10/2020
		Betreuung der Studienarbeit: Entwicklung und simulative Validierung eines morphologischen Kastens zur Auslegung von Transportnetzen anhand einer Szenarienstudie mittels Plant Simulation; M. Hassan, Leibniz Universität Hannover	06/2020- 12/2020
		Anstellung von studentischen Hilfskräften	Während der gesam- ten Projekt- laufzeit
Projekt- begleitender Ausschuss	Auswahl Transport- systeme, Restriktionen bei der Layout- planung Erfahrungsaustausch	1. gemeinsames Abstimmungstreffen: Vorstellung erster Ergebnisse, Diskussion und Austausch	13.03.2019
		2. gemeinsames Abstimmungstreffen: Vorstellung aktueller Ergebnisse, Diskussion und Austausch	14.07.2020
		3. gemeinsames Abstimmungstreffen: Vorstellung aktueller Ergebnisse, Diskussion und Austausch	15.12.2020
		4. gemeinsames Abstimmungstreffen: Vorstellung aktueller Ergebnisse, Diskussion und Austausch	31.03.2021
		Datenaufnahme, Diskussionen zu logistischen Fragestellungen	Während der gesam- ten Projekt- laufzeit

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	Während der gesamten Projektlaufzeit
--	--	--	--------------------------------------

Tabelle 14.: Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft (spezifisch geplante Transfermaßnahmen)

Maßnahme	Ziele	Rahmen	Zeitraum
Veröffentlichungen, Information der interessierten Öffentlichkeit	Information der interessierten Öffentlichkeit und Wissenstransfer in die Wirtschaft	Veröffentlichung zu den gesamten Projektergebnissen	10/2021
Akademische Lehre und berufliche Weiterbildung	Qualifizierung von Studenten	Integration der Ergebnisse in Lehrveranstaltungen des IPH	07/2021 ff.
		Dissertationsschrift durch wissenschaftlichen Mitarbeiter	07/2021 ff.
Weiterentwicklung und stetige Aktualisierung des Softwaredemonstrators	Bereitstellung eines stets aktuellen Softwaredemonstrators	IPH, Anpassung des Systemumfangs des Softwaredemonstrators	07/2021 ff.
Nutzung des Softwaredemonstrators in eigenen Fabrikplanungsprojekten	Effizienzsteigerung der eigenen Fabrikplanung	IPH, Fabrikplanungsprojekte	07/2021 ff.

10. Einschätzung der Realisierbarkeit der geplanten Maßnahmen

Die Methode zur automatisierten Transportmittelauswahl und Layoutplanung bietet KMU die Möglichkeit aufwandsarm ein geeignetes Transportmittel auszuwählen sowie aktuell verwendete Transportmittel zu hinterfragen und anschließend die Layoutplanung, unter Berücksichtigung neuer Rahmenbedingungen, einfach und zeiteffizient durchzuführen. Für die Nutzung sind keine

zusätzlichen Investitionen (z. B. Gerätebeschaffungen, Beratungsleistungen) nötig. Der in diesem Vorhaben entwickelte Softwaredemonstrator ist als Webapplikation implementiert worden und bietet somit eine aufwandsarme Anwendung der Ergebnisse. Dies ist insbesondere für KMU mit begrenzten Ressourcen relevant.

11. 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 Mutterinstitute 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. Christian Kutzner

Wissenschaftliche Mitarbeiterin der Abteilung Logistik des IPH

12. Förderhinweis

Das IGF-Vorhaben 19994N 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 Energie (BMWi) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Für die Förderung sei an dieser Stelle gedankt.

13. Anhang

13.1. Anhang 1: Steckbrief Dreiradstapler

Klassifizierung:

- Unstetigförderer
- flurgebunden
- gleislos

Bezeichnung: STILL RX 20-20 L¹



1

Allgemeines	Einheiten	Charakteristik
Breite	[mm]	1.149
Länge	[mm]	2.866
Höhe	[mm]	2.035
Eigengewicht	[kg]	3.486
Wenderadius	[mm]	1.678

Leistungsdaten	Einheiten	Charakteristik
Maximale Abmessung der Fördereinheit	[mm]	1.200 x 1.000, Langgut, Wickelgut
Handhabung	[-]	Unterfahrbar
Traglast	[t]	2
Durchsatzleistung	[-]	Mittel
Geschwindigkeit	[km/h]	16
Anzahl Fördereinheiten	[-]	1
Hubgeschwindigkeit	[m/s]	0,45
Senkgeschwindigkeit	[m/s]	0,48
Zugkraft	[N]	4.800
Antriebsart	[-]	Elektrisch, Batterie

Wirtschaftlichkeit	Einheiten	Charakteristik
Investitionskosten	[€]	25.000
Wartungskosten	[€/Jahr]	1.875
Personalkosten	[€/Jahr]	60.000
Abschreibungsdauer	[Jahre]	8
Eignung Schichtmodell	[-]	1 und 2 Schichten

Transportprozess	Einheiten	Charakteristik
Förderart	[-]	Verkehrsweg

Horizontaler Förderbereich	[m]	Bis 200
Vertikaler Förderbereich	[mm]	3.180
Eignung Schwankungsverhalten	[-]	Unregelmäßig, Regelmäßig
Unterstützungsgrad	[-]	Manuell
Arbeitsgangbreite	[mm]	3.390/3.516 (Palette quer/längs)
Verkehrswegbreite Einbahnverkehr	[m]	2,11
Verkehrswegbreite Richtungsverkehr	[m]	2,61
Eignung Materialfluss	[-]	Gerichtet
Förderwegflexibilität	[-]	Flexibel
Lastübergabe an Förderweg	[-]	Möglich
Fertigungsart	[-]	Einzel-, Serienfertigung
Fertigungsprinzipien	[-]	Werkstattprinzip, Fertigungsinsel, Baustellenprinzip
Pufferfähigkeit	[-]	Gering

13.2. Anhang 2: Einflussfaktoren auf die Layoutgestaltung

Gestalt des Förderwegs																	
	Grundstruktur	Stapler	Gehgerät	Niederhubwagen	Hochhubwagen	Schlepper	Lastziehende FTS	Lastragende FTS	Regalbediengeräte	Verschiebeeinrichtungen	Band-, Ketten-, und Rollenförderer	Elektrohängebahn	Portalkran	Drehkran	Brückenkran	Stapelkran	
	Zusätzliche Wege	○	○	○	○	○	○	○	○	○	●	●	○	○	○	○	○
	Personenverkehr	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

Abbildung 13.1: Einflüsse des Kriteriums Gestalt der Förderwege

Wegbreite																	
	Verkehrswegbreite	Stapler	Gehgerät	Niederhubwagen	Hochhubwagen	Schlepper	Lastziehende FTS	Lastragende FTS	Regalbediengeräte	Verschiebeeinrichtungen	Band-, Ketten-, und Rollenförderer	Elektrohängebahn	Portalkran	Drehkran	Brückenkran	Stapelkran	
	Einbahn-/ Direktverkehr	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	Arbeitsgangbreite	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	Kurvenbereich	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

Abbildung 13.2: Einflüsse des Kriteriums Wegbreite

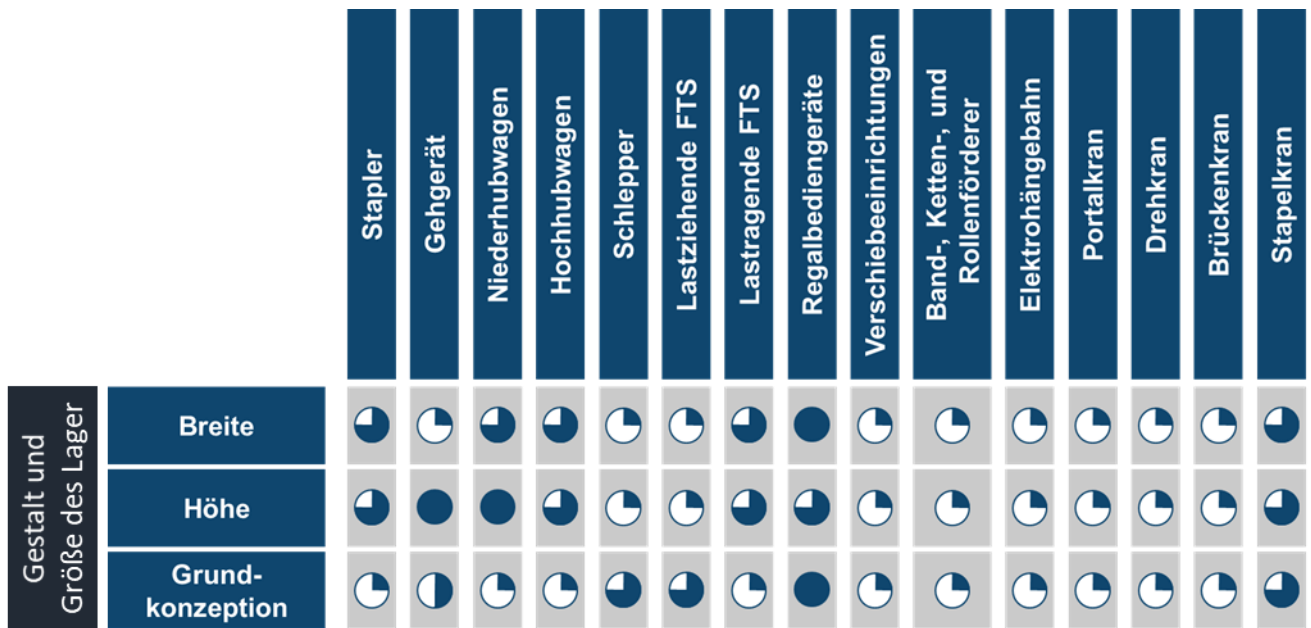


Abbildung 13.3: Einflüsse des Kriteriums Gestalt und Größe des Lagers

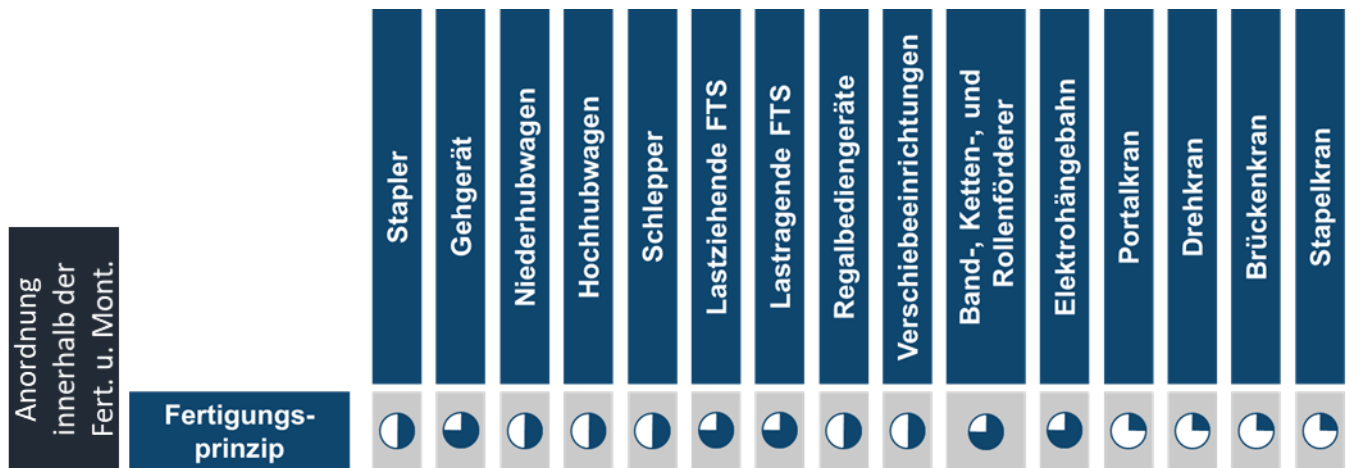


Abbildung 13.4: Einflüsse des Kriteriums Anordnung innerhalb der Fertigung und Montage

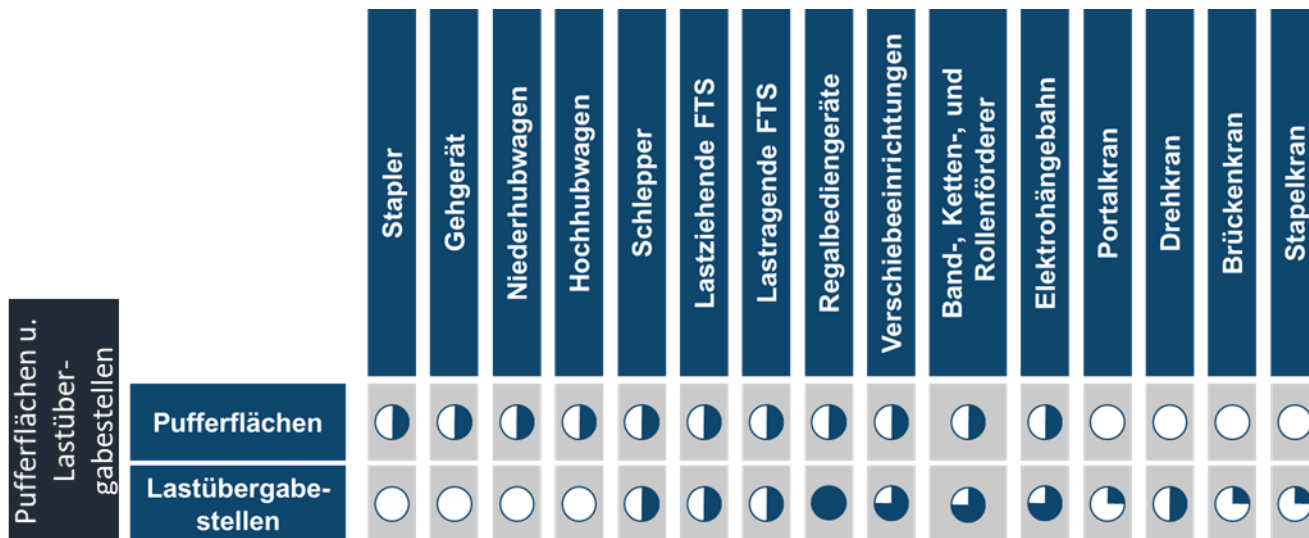


Abbildung 13.5: Einflüsse des Kriteriums Pufferflächen und Lastübergabestellen

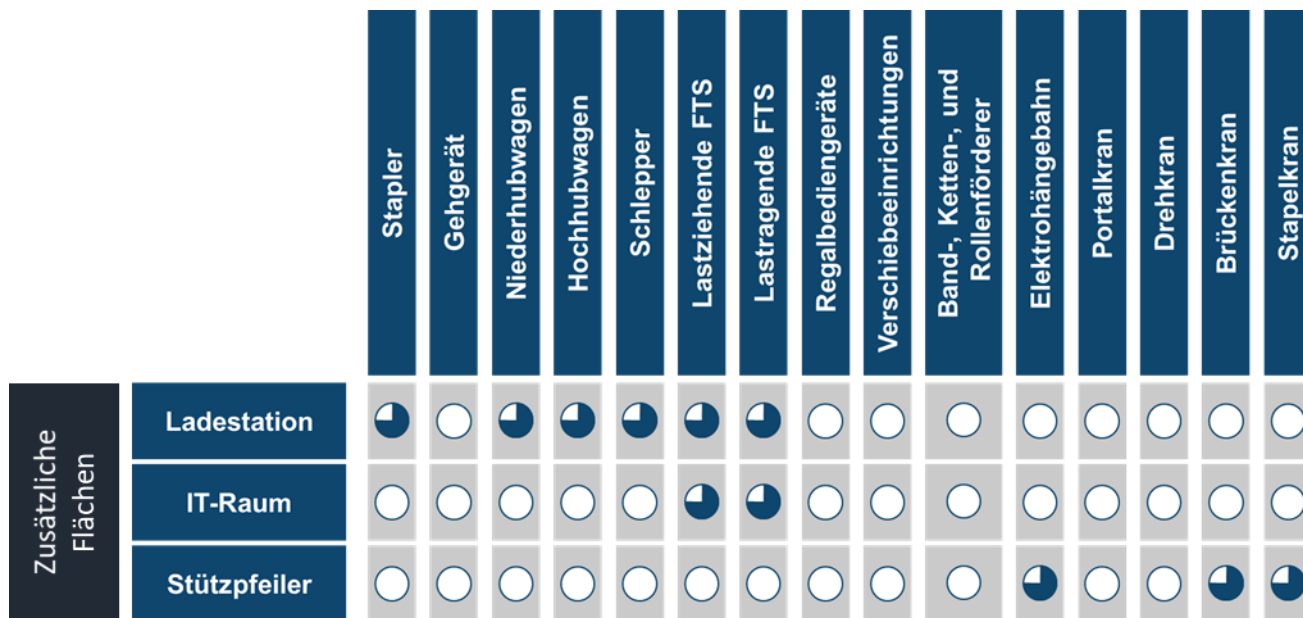
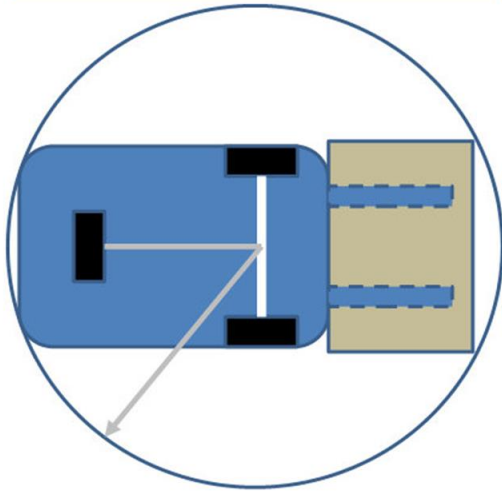


Abbildung 13.6: Einflüsse des Kriteriums zusätzliche Flächen

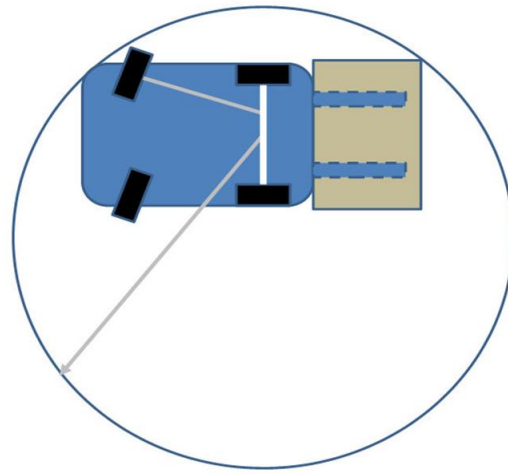
13.3. Anhang 3: Einflussfaktoren auf die Wegenetzeauslegung

Wenderadius 3-Rad Stapler



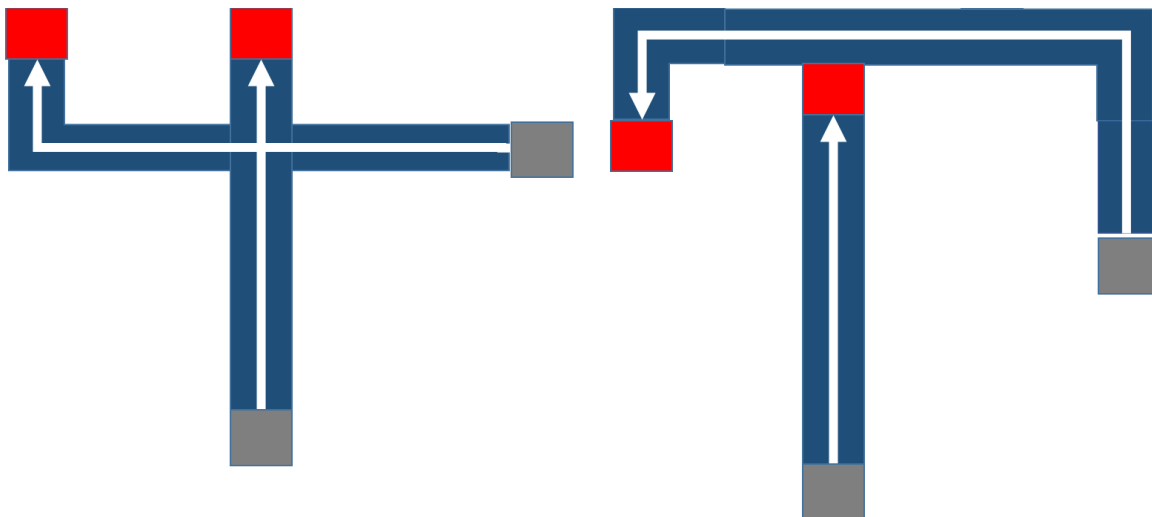
a

Wenderadius 4-Rad Stapler



b

Abbildung 13.7: Wenderadius



a

b

Abbildung 13.8: Einfluss Kreuzungen

13.4. Anhang 4: Regelbasis Eingangsparameter Fördereinheit

WENN		DANN
Gewicht	Abmessung	Fördereinheit
--	--	--
--	-	-
--	0	0
--	+	0
-	-	-
-	0	0
-	+	+
0	0	0
0	+	+
+	+	++
++	+	++

Abbildung 13.9: Regelbasis Eingangsparameter Fördereinheit

13.5. Anhang 5: Zugehörigkeitsfunktionen Fuzzy-Logik

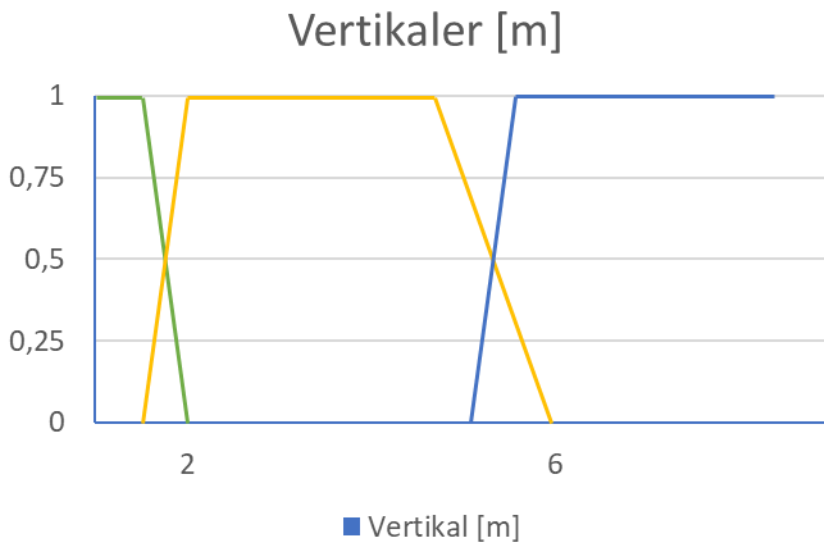


Abbildung 13.10: Zugehörigkeitsfunktionen zu dem Fuzzy-Set Vertikaler Transport

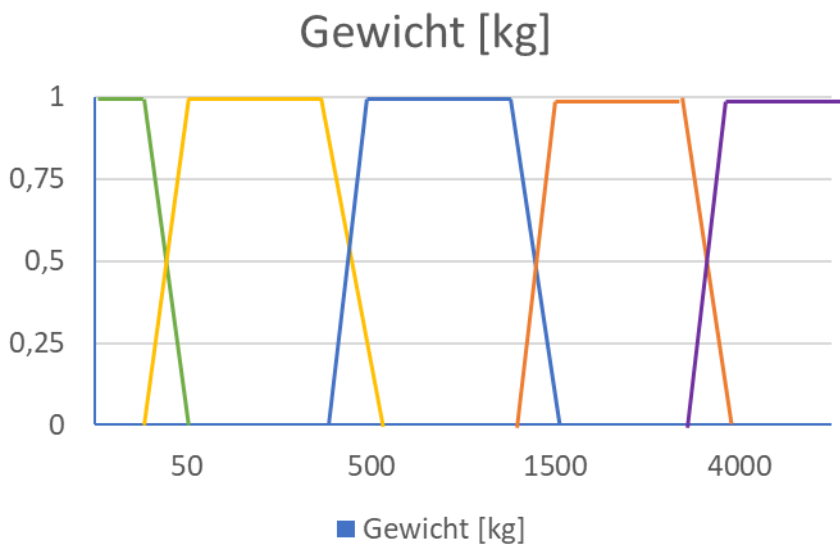


Abbildung 13.11: Zugehörigkeitsfunktionen zu dem Fuzzy-Set Gewicht

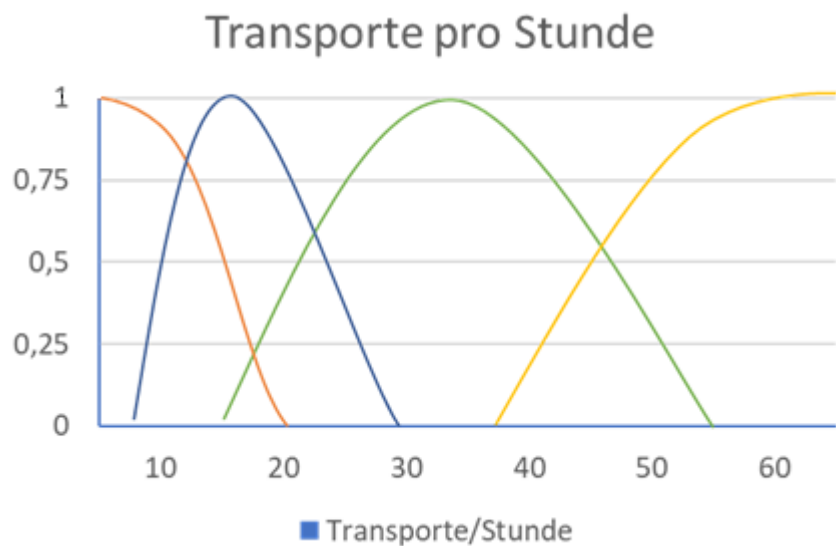


Abbildung 13.12: Zugehörigkeitsfunktionen zu dem Fuzzy-Set Transporte pro Stunde

13.6. Anhang 6: Regelbasis der Zwischenstufe

WENN		DANN													
Förderbereich	Fördereinheit	Förderprozess	Vierrad Gabelstapler	Schubmast stapler	Handgabelhubwagen	Handwagen	Lasttragende fahrerlose Transportsysteme (bis 50kg)	Lasttragende fahrerlose Transportsysteme (500 kg)	Lasttragende fahrerlose Transportsysteme (über 1500kg)	Lastziehende Transportsysteme (ST)	Plattenbandförderer	Röllchenbahnen Behälter	Elektrohängebahn	Brückenkran Einträgerlaufkran	Brückenkran Zweiträgerlaufkran
--	--	--	--	+	++	++	0	-	--	--	--	-	--	--	--
--	--	-	-	+	++	++	+	0	-	--	--	0	--	--	--
--	--	0	--	+	0	+	+	0	-	--	--	+	--	--	--
--	--	+	--	0	-	-	++	0	-	--	0	++	0	/	/
--	-	--	0	+	++	+	-	0	-	--	--	-	--	0	-
--	-	-	+	+	++	+	0	0	0	--	-	0	--	-	--
--	-	0	0	+	0	0	+	0	-	-	0	+	-	--	--
--	-	+	0	+	-	-	+	++	+	-	+	+	0	/	/
--	0	--	+	+	++	-	/	0	0	/	--	/	--	+	0
--	0	-	+	+	+	--	/	+	+	/	-	/	--	-	-
--	0	0	0	+	0	--	/	+	+	/	0	/	-	--	--
--	0	+	-	0	-	--	/	++	++	/	+	/	0	/	/
--	+	--	+	/	/	/	/	/	/	/	/	/	--	++	+
--	+	-	++	/	/	/	/	/	/	/	/	/	-	+	0
--	+	0	+	/	/	/	/	/	/	/	/	/	-	0	0
--	+	+	0	/	/	/	/	/	/	/	/	/	0	/	/
--	++	--	++	/	/	/	/	/	/	/	/	/	0	++	++
--	++	-	++	/	/	/	/	/	/	/	/	/	0	++	++
--	++	0	++	/	/	/	/	/	/	/	/	/	+	+	+
--	++	+	+	/	/	/	/	/	/	/	/	/	+	/	/

WENN		DANN													
Förderbereich	Förderreinheit	Förderprozess	Vierrad Gabelstapler	Schubmaststapler	Handgabelhubwagen	Handwagen	Lasttragende fahrerlose Transportsysteme (bis 50kg)	Lasttragende fahrerlose Transportsysteme (500 kg)	Lasttragende fahrerlose Transportsysteme (über 1500kg)	Lastziehendes fahrerloses Transportsystem (ST)	Plattenbandförderer	Röllchenbahn Behälter	Elektrohängebahn	Brückenkran Eintragerlaufkran	Brückenkran Zweitragerlaufkran
-	-	-	0	0	++	++	0	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	+	+	+	+	+	0	-	0	-	0	-	-	-
-	-	0	-	+	-	-	++	0	-	+	0	+	-	-	-
-	-	+	-	0	/	/	++	0	-	+	0	++	0	/	/
-	-	-	0	+	++	+	-	0	-	-	-	-	-	+	0
-	-	-	+	++	+	0	0	0	0	0	-	0	-	0	-
-	-	0	0	+	-	-	+	++	0	+	0	+	0	-	-
-	-	+	0	0	/	/	++	+	+	++	+	+	+	/	/
-	0	-	+	+	+	0	/	0	0	/	-	/	-	+	0
-	0	-	++	+	0	-	/	0	+	/	-	/	-	0	-
-	0	0	0	0	-	-	/	+	++	/	+	/	0	-	-
-	0	+	-	0	/	/	/	+	++	/	++	/	+	/	/
-	+	-	+	/	/	/	/	/	/	/	/	/	-	+	+
-	+	-	++	/	/	/	/	/	/	/	/	/	-	+	0
-	+	0	+	/	/	/	/	/	/	/	/	/	0	0	0
-	+	+	-	/	/	/	/	/	/	/	/	/	+	/	/
-	++	-	+	/	/	/	/	/	/	/	/	/	0	++	++
-	++	-	++	/	/	/	/	/	/	/	/	/	0	++	++
-	++	0	++	/	/	/	/	/	/	/	/	/	+	+	+
-	++	+	-	/	/	/	/	/	/	/	/	/	+	/	/

WENN		DANN													
Förderbereich	Fördereinheit	Förderprozess	Vierrad Gabelstapler	Schubmast stapler	Handgabelhubwagen	Handwagen	Lasttragende fahrerlose Transportsysteme (bis 50kg)	Lasttragende fahrerlose Transportsysteme (500 kg)	Lasttragende fahrerlose Transportsysteme (über 1500kg)	Lastziehende fahrerlose Transportsysteme (5T)	Plattenbandförderer	Röllchenbahn Behälter	Elektrohängbahn	Brückenkran Einträgerlaufkran	Brückenkran Zweiträgerlaufkran
0	--	--	0	+	-	-	-	--	--	-	--	0	--	--	--
0	--	-	+	+	-	-	+	0	-	0	-	0	--	--	--
0	--	0	-	+	-	-	++	0	-	+	0	+	--	--	--
0	--	+	--	0	/	/	+	0	-	++	0	++	0	/	/
0	-	--	0	+	-	-	-	-	-	-	--	-	--	+	0
0	-	-	+	+	-	-	0	+	0	0	-	0	-	0	-
0	-	0	0	0	/	/	+	++	+	+	0	+	0	--	--
0	-	+	0	0	/	/	+	+	0	++	+	++	+	/	/
0	0	--	+	+	-	--	/	0	0	/	--	/	--	+	0
0	0	-	++	+	-	--	/	0	+	/	0	/	-	0	-
0	0	0	0	0	/	/	/	+	++	/	+	/	+	--	--
0	0	+	-	-	/	/	/	0	+	/	++	/	+	/	/
0	+	--	+	/	/	/	/	/	/	/	/	/	-	++	+
0	+	-	++	/	/	/	/	/	/	/	/	/	-	+	0
0	+	0	0	/	/	/	/	/	/	/	/	/	+	-	-
0	+	+	-	/	/	/	/	/	/	/	/	/	++	/	/
0	++	--	+	/	/	/	/	/	/	/	/	/	-	++	++
0	++	-	++	/	/	/	/	/	/	/	/	/	0	++	++
0	++	0	+	/	/	/	/	/	/	/	/	/	+	0	0
0	++	+	-	/	/	/	/	/	/	/	/	/	++	/	/

WENN				DANN											
Förderbereich	Fördereinheit	Förderprozents	Vierrad Gabelstapler	Schubmaststapler	Handgabelhubwagen	Handwagen	Lasttragende fahrerlose Transportsysteme (bis 50kg)	Lasttragende fahrerlose Transportsysteme (500 kg)	Lasttragende fahrerlose Transportsysteme (über 1500kg)	Lastziehendes fahrerloses Transportsysteme (5T)	Plattenbandförderer	Röllchenbahn Behälter	Elektrohängebahn	Brückenkran Eintragerlaufkran	Brückenkran Zweitragerlaufkran
+	--	--	0	+	/	/	/	/	/	/	-	0	-	0	-
+	--	-	0	+	/	/	/	/	/	/	-	0	-	0	-
+	--	0	-	0	/	/	/	/	/	/	0	+	-	-	-
+	--	+	/	/	/	/	/	/	/	/	0	++	0	/	/
+	-	--	0	+	/	/	/	/	/	/	-	-	-	+	0
+	-	-	+	+	/	/	/	/	/	/	-	0	-	0	-
+	-	0	0	0	/	/	/	/	/	/	0	+	0	-	-
+	-	+	/	/	/	/	/	/	/	/	+	++	+	/	/
+	0	--	+	+	/	/	/	/	/	/	-	/	-	+	0
+	0	-	+	+	/	/	/	/	/	/	0	/	-	+	-
+	0	0	0	0	/	/	/	/	/	/	+	/	+	-	-
+	0	+	/	/	/	/	/	/	/	/	++	/	+	/	/
+	+	--	+	/	/	/	/	/	/	/	/	/	-	++	+
+	+	-	++	/	/	/	/	/	/	/	/	/	-	+	0
+	+	0	0	/	/	/	/	/	/	/	/	/	+	-	-
+	+	+	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	++	/	/
+	++	--	+	/	/	/	/	/	/	/	/	/	-	++	++
+	++	-	+	/	/	/	/	/	/	/	/	/	0	++	++
+	++	0	-	/	/	/	/	/	/	/	/	/	+	0	0
+	++	+	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	++	/	/

WENN				DANN											
Förderbereich	Fördereinheit	Förderprozess	Vierrad Gabelstapler	Schubmaststapler	Handgabelhubwagen	Handwagen	Lasttragende fahrerlose Transportsysteme (bis 50kg)	Lasttragende fahrerlose Transportsysteme (500 kg)	Lasttragende fahrerlose Transportsysteme (über 1500kg)	Lastziehende fahrerlose Transportsysteme (5T)	Plattenbandförderer	Röllchenbahnbehälter	Elektrohängebahn	Brückenkran Einträgerlaufkran	Brückenkran Zweiträgerlaufkran
++	--	--	/	--	/	/	/	/	/	/	--	0	--	/	/
++	--	-	/	--	/	/	/	/	/	/	-	0	--	/	/
++	--	0	/	/	/	/	/	/	/	/	0	+	--	/	/
++	--	+	/	/	/	/	/	/	/	/	0	++	0	/	/
++	-	--	/	-	/	/	/	/	/	/	--	-	--	/	/
++	-	-	/	--	/	/	/	/	/	/	-	0	-	/	/
++	-	0	/	/	/	/	/	/	/	/	0	+	0	/	/
++	-	+	/	/	/	/	/	/	/	/	+	++	+	/	/
++	0	--	/	--	/	/	/	/	/	/	--	/	--	0	0
++	0	-	/	--	/	/	/	/	/	/	0	/	-	--	--
++	0	0	/	/	/	/	/	/	/	/	+	/	+	/	/
++	0	+	/	/	/	/	/	/	/	/	++	/	+	/	/
++	+	--	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	-	0	0
++	+	-	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	-	--	--
++	+	0	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	+	/	/
++	+	+	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	++	/	/
++	++	--	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	-	0	0
++	++	-	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	0	--	--
++	++	0	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	+	/	/
++	++	+	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	++	/	/

13.7. Anhang 7: Mathematisches Modell zur Layoutplanung

Indizes:

A	$\in \mathbb{N}$; Menge der Kanten a , die die Knoten (i, j) verknüpft
$Aisle_Width_v$	$\in \mathbb{N}$; erforderliche Arbeitsgangbreite für einen Transport mit dem Transportmittel v in ganzzahligen Einheits-elementen
$BigM$	$\in \mathbb{N}$; ausreichend große Zahl, Einführung aus Modellierungsgründen
CK	$\in \mathbb{N}$; Menge der Voraussetzungen ck , die in einer Elementarzelle im Groblayout erfüllt oder von einer Abteilung gefordert werden; identifizierte Bedingungen werden aufsteigend von 1 bis CK nummeriert
F_k	$\in \mathbb{N}$; Menge der einer Abteilung k zugeordneten Elemente f , sodass die Vereinigung aller Elemente 1 bis F_{max}^k die Abteilung vollständig abbildet
I	$\in \mathbb{N}$; Menge der Knotenpunkte i im Groblayout, die entlang der Hauptverkehrswege positioniert sind mit $1 \leq i \leq I_{max}$
K	$\in \mathbb{N}$; Menge der im Layout anzuordnenden Abteilungen oder Bereiche k
KX	$\in \mathbb{N}$; Menge der relativen Koordinaten im lokalen Koordinatensystem einer Abteilung; linke, untere Ecke als $kx = 1$ mit $1 \leq kx \leq KX_{max}$
KY	$\in \mathbb{N}$; Menge der relativen Koordinaten im lokalen Koordinatensystem einer Abteilung; linke, untere Ecke als $ky = 1$ mit $1 \leq ky \leq KY_{max}$
M_k	$\in \mathbb{N}$; Menge der der Abteilung k zugehörigen Maschinen m
V	$\in \mathbb{N}$; Menge der für den Materialfluss verfügbaren Transportmittel $v \in V$
W	$\in \mathbb{N}$; Menge der Wegelemente w , die miteinander verknüpft den Transportweg zwischen zwei Abteilungen k und l ausbilden; dabei startet $w = 1$ am Outputelement der Abteilung k mit $1 \leq w \leq W_{max}$
X	$\in \mathbb{N}$; Menge der Elementarzellen in horizontaler Richtung x als maximale Ausdehnung der verfügbaren Grundfläche von 1 bis X
Y	$\in \mathbb{N}$; Menge der Elementarzellen in vertikaler Richtung y als maximale Ausdehnung der verfügbaren Grundfläche von 1 bis Y

Parameter:

$A_{netto,k}$	$\in \mathbb{R}_0^+$; Netto-Flächenbedarf der Abteilung k aufgrund der zugeordneten Betriebsmittel
$Cond_{Fac,x,y}^{ck}$	1, wenn die Elementarzelle an der Position (x,y) die ck -te Voraussetzung erfüllt; 0 sonst
$EC_{Fac,ck}^k$	1, wenn die ck -te Anforderung eine Bedingung für das Platzieren der Abteilung k darstellt; 0 sonst
$Fixed_{Fac}^k$	1, wenn die bereits platzierte Abteilung k fixiert ist und daher nicht im Rahmen der Layoutgestaltung verschoben werden darf; 0 sonst
$Fixed_{Mach}^{m,k}$	1, wenn die Abteilung k eine Maschine m beinhaltet, die fest platziert ist und daher nicht räumlich verschoben werden darf; 0 sonst
$fl_{k,l,v}$	$\in \mathbb{R}_0^+$; Materialfluss im modellrelevanten Betrachtungszeitraum von Abteilung k zu Abteilung l durch Transportmittel v
I_{max}	$\in \mathbb{N}$; maximale Zahl an Knotenpunkten, größer als die Anzahl separater Input- und Outputstellen einer Abteilung; Einführung aus modellierungstechnischen Gründen als obere Grenze der Menge I
$k_{Path,k}$	$\in \mathbb{R}_0^+$; empirischer Faktor für den relativen Flächenanteil der Transportwege in einer Abteilung k
KX_{max}	$\in \mathbb{N}$; maximale Ausdehnung einer Abteilung in x-Richtung; Einführung aus modellierungstechnischen Gründen als obere Grenze der Menge KX
KY_{max}	$\in \mathbb{N}$; maximale Ausdehnung einer Abteilung in y-Richtung; Einführung aus modellierungstechnischen Gründen als obere Grenze der Menge KY
Low_X_k	$\in \mathbb{N}$; minimale horizontale Seitenlänge der Abteilung k
Low_Y_k	$\in \mathbb{N}$; minimale vertikale Seitenlänge der Abteilung k

$MoveCost_{Fac}^k$	$\in \mathbb{R}_0^+$; Kosten, die mit der Veränderung der Abteilung k in Position oder Form einhergehen; für Neuplanungen oder bislang nicht platzierte Abteilungen fallen keine Kosten der Neuordnung an
$MoveCost_{Mach}^{m,k}$	$\in \mathbb{R}_0^+$; Kosten, die mit der Umpositionierung einer bereits platzierten Maschine m zugehörig zur Abteilung k einhergehen; für Neuplanungen oder bislang nicht platzierte Maschinen fallen keine Kosten der Neuordnung an
$Path_Cost$	$\in \mathbb{R}_0^+$; Kostenfaktor, der für die Erzeugung, Nutzung und Kontrolle eines temporären Wegelements im Groblayout anfällt
$Perm_Road_{x,y}$	1, wenn die Elementarzelle an der Position (x,y) Teil eines fixen, permanenten Transportweges ist und damit keine Platzierung von Abteilungen oder Maschinen zulässt; entnommen aus Erfahrungswerten oder vorgegebener Infrastruktur; 0 sonst
$Rest_{x,y}$	1, wenn die Elementarzelle an der Position (x,y) nicht von einer Abteilung oder einem Wegelement belegt werden kann (Verhinderung von trennenden Wänden); 0 sonst
sl_{rough}^{ne}	$\in \mathbb{R}_0^+$; Seitenlänge der Elementarzellen im Groblayout
$Start_{Fac}^{Hor,k}$	$\in \mathbb{N}$; horizontale Ausdehnung der Abteilung k in Elementarzellen, wenn diese bereits besteht
$Start_{Fac}^{Vert,k}$	$\in \mathbb{N}$; vertikale Ausdehnung der Abteilung k in Elementarzellen, wenn diese bereits besteht
$Start_{Fac,x,y}^{Pos,k}$	1, wenn Abteilung k bezogen auf die linke untere Ecke bereits bei (x,y) platziert ist; 0 sonst
$Start_{Mach}^{Hor,m,k}$	$\in \mathbb{N}$; horizontale Ausdehnung des die platzierte Maschine m der Abteilung k umschließenden, minimalen Rechtecks in Elementarzellen des Groblayouts
$Start_{Mach,x,y}^{Pos,m,k}$	1, wenn die linke untere Ecke des die platzierte Maschine m der Abteilung k umschließenden, minimalen Rechtecks den Koordinaten (x,y) im Groblayout zugewiesen ist; 0 sonst
$Start_{Mach}^{Ver,m,k}$	$\in \mathbb{N}$; vertikale Ausdehnung des die platzierte Maschine m der Abteilung k umschließenden, minimalen Rechtecks in Elementarzellen des Groblayouts
tc_v	$\in \mathbb{R}_0^+$; Kosten für den Transport einer Mengeneinheit über ein Einheitssegment des Groblayouts mit dem Transportmittel v
Up_X_k	$\in \mathbb{N}$; maximale horizontale Seitenlänge der Abteilung k
Up_Y_k	$\in \mathbb{N}$; maximale vertikale Seitenlänge der Abteilung k
W_{max}	$\in \mathbb{N}$; maximale Zahl an Wegsegmenten; Einführung aus modellierungstechnischen Gründen als obere Grenze der Menge W

Variablen:

$Aisle_Width_{Arc,i,j}^{max}$	$\in \mathbb{N}$, maximale Arbeitsgangbreite des die Knoten i und j verbindenden Ganges
$Aisle_Width_{Node,i}^{max}$	$\in \mathbb{N}$, maximale Arbeitsgangbreite aller an den Knoten i angrenzenden Gänge
$d_{i,j}$	$\in \mathbb{N}$; Länge der Kante a , die die Knoten i und j verbindet; gemessen in Zahl der Elementarzellen
$Dist_i^{below}$	$\in \mathbb{N}$, minimaler Abstand aller unterhalb gelegenen Knoten zum Knoten i
$Dist_i^{left}$	$\in \mathbb{N}$, minimaler Abstand aller links gelegenen Knoten zum Knoten i
$Dist_i^{right}$	$\in \mathbb{N}$, minimaler Abstand aller rechts gelegenen Knoten zum Knoten i
$Dist_i^{up}$	$\in \mathbb{N}$, minimaler Abstand aller oberhalb gelegenen Knoten zum Knoten i
$dist_{k,l}$	$\in \mathbb{R}_0^+$; kürzeste Strecke entlang der definierten Transportwege zwischen Output der Abteilung k und Input der Abteilung l
$DownNode_{i,j}$	1, wenn der Knoten j unterhalb vom Knoten i liegt; 0 sonst
$E_{f,kx,ky}^k$	1, wenn das f -te Element der Abteilung k relativ zur unteren, linken Ecke den lokalen Koordinaten (kx, ky) zugeordnet ist; 0 sonst
$Edge_{x,y}^k$	1, wenn die Koordinaten (x, y) Teil des Randes der Abteilung k bilden; 0 sonst
EX^k	$\in \mathbb{N}$; horizontale Ausdehnung der Abteilung k
EY^k	$\in \mathbb{N}$; vertikale Ausdehnung der Abteilung k
$In_{Fac,x,y}^k$	1, wenn Input der Abteilung k an den Koordinaten (x, y) verortet ist; 0 sonst
$LeftNode_{i,j}$	1, wenn der Knoten j links vom Knoten i liegt; 0 sonst
$Loc_{f,x,y}^k$	1, wenn das f -te Element der Abteilung k der Elementarzelle (x, y) zugeordnet ist; 0 sonst
$Moved_{Fac}^k$	1, wenn im Anwendungsfall einer Reorganisation die Abteilung k zuvor platziert war und im erzeugten Layout hinsichtlich Position oder Form verändert worden ist
$Moved_{Mach}^{m,k}$	1, wenn Maschine m der Abteilung k durch die Neuordnung im Groblayout nicht an seiner angestammten Position verbleiben kann und verschoben werden muss; 0 sonst
$N_{i,x,y}$	1, wenn Knotenpunkt n der Elementarzelle (x, y) zugeordnet ist
$Neigh_{i,j}^{above}$	1, wenn der Knoten j den oberen Nachbarknoten mit minimalem Abstand vom Knoten i bildet; 0 sonst
$Neigh_{i,j}^{below}$	1, wenn der Knoten j den unteren Nachbarknoten mit minimalem Abstand vom Knoten i bildet; 0 sonst
$Neigh_{i,j}^{left}$	1, wenn der Knoten j den linken Nachbarknoten mit minimalem Abstand vom Knoten i bildet; 0 sonst
$Neigh_{i,j}^{right}$	1, wenn der Knoten j den rechten Nachbarknoten mit minimalem Abstand vom Knoten i bildet; 0 sonst

$Neigh_{i,j}$	1, wenn Knoten j den Nachbarknoten mit minimalem Abstand in eine der vier Richtungen ausgehend von Knoten i bildet; 0 sonst
$Node_{x,y}^{Corner,i}$	1, wenn es sich bei dem in der Elementarzelle (x,y) platzierten Knoten i um einen Eckpunkt des Transportweges handelt; 0 sonst
$Node_{x,y}^{Cross,i}$	1, wenn es sich bei dem in der Elementarzelle (x,y) platzierten Knoten i um einen Kreuzungspunkt des Transportnetzes handelt; 0 sonst
$Node_{Fac,x,y}^{Input,k,i}$	1, wenn der in der Elementarzelle (x,y) positionierte Knoten i dem Input der Abteilung k zugeordnet ist; 0 sonst
$Node_{Fac,x,y}^{Output,k,i}$	1, wenn der in der Elementarzelle (x,y) positionierte Knoten i dem Output der Abteilung k zugeordnet ist; 0 sonst
$Occ_{Fac,x,y}^k$	1, wenn die Elementarzelle (x,y) von der Abteilung k belegt ist; 0 sonst
$Out_{Fac,x,y}^k$	1, wenn Output der Abteilung k an den Koordinaten (x,y) verortet ist; 0 sonst
$Path_{k,l,i,j}^w$	1, wenn die gerichtete Kante $(i,j) \in A$ das w -te Segment des realisierten, optimalen Transportweges zwischen den Abteilungen k und l ist; 0 sonst
$Pos_{x,y}^k$	1, wenn das linke untere Element der Abteilung k den Koordinaten (x,y) zugeordnet ist
$RightNode_{i,j}$	1, wenn der Knoten j rechts vom Knoten i liegt; 0 sonst
$Road_{x,y}$	1, wenn die Elementarzelle an der Position (x,y) als Wegelement genutzt wird; 0 sonst
$Road_{x,y}^{Ref}$	1, wenn die Elementarzelle an der Position (x,y) im Erstellungsprozess des Wegenetzes als Wegelement ausgewiesen wird und für die Generierung der Gänge mit erforderlicher Breite als Referenzobjekt dient
$Road_{x,y,i,j}^{Ref}$	1, wenn die Elementarzelle an der Position (x,y) im Erstellungsprozess des Wegenetzes als Wegelement zwischen den Knoten i und j ausgewiesen wird und für die Generierung der Gänge mit erforderlicher Breite als Referenzobjekt dient
$Temp_Road_{x,y}$	1, wenn die Elementarzelle an der Position (x,y) als temporäres Wegelement genutzt wird, das nicht im Vorhinein als fixes, permanentes Wegelement vorgegeben ist; 0 sonst
$UpNode_{i,j}$	1, wenn der Knoten j oberhalb vom Knoten i liegt; 0 sonst

Hilfsgrößen:

$A_{brutto,k}$	$\in \mathbb{R}_0^+$; Brutto-Flächenbedarf der Abteilung k für Betriebsmittel und Transportflächen; berechnet über $A_{netto,k} \cdot k_{Path,k} = A_{brutto,k}$
F_{max}^k	$\in \mathbb{N}$; maximale Zahl an Elementarzellen, die einer Abteilung k angehören; diese liegt in der Wahl der Seitenlängen einer Elementarzelle begründet
$Flow_{k,l}$	1, wenn zwischen den Abteilungen k und l eine Transportbeziehung vorliegt; 0 sonst; berechnet über $Flow_{k,l} = Greater(\sum_{v=1}^V fl_{k,l,v}, 0) \forall k, l \in K, k \neq l$
	berechnet über $\left\lceil \frac{A_{brutto,k}}{(s_{rough}^{ue})^2} \right\rceil$
$Greater(x,y)$	1, wenn x größer als y ist, mit $(x,y \in \mathbb{N})$; 0 sonst berechnet über $Greater(x,y) = \frac{\max(x,y)-y}{\max(1,x-y)}$
$Ident(x,y)$	1, wenn x gleich y ist, mit $(x,y \in \mathbb{N})$; 0 sonst berechnet über $Ident(x,y) = (1-Greater(x,y)) \cdot (1-Greater(y,x))$
$Vehicle_{k,l,v}$	1, wenn das Transportmittel v für den Transport zwischen Abteilung k und l verwendet wird; 0 sonst; berechnet über $Vehicle_{k,l,v} = Greater(fl_{k,l,v}, 0) \forall k, l \in K, k \neq l, v \in V$

Die zu betrachtende Planungsfläche der Produktionsstätte kann dementsprechend als aufgespanntes Rechteck der Größe $X \times Y$ angesehen werden. Abweichende Realflächen können in ihrer Form über den binären Parameter $Rest_{x,y}$ angepasst werden. Elemente werden als benachbart bezeichnet, wenn sie rechtwinklig aneinandergrenzen, d.h. oberhalb, unterhalb, links oder rechts voneinander liegen (nicht diagonal).

$$\begin{aligned}
\text{Min } Z = & \sum_{k=1}^K \sum_{l=1, l \neq k}^L \sum_{v=1}^V tc_v \cdot fl_{k,l,v} \cdot dist_{k,l} + \sum_{k=1}^K MoveCost_{Fac}^k \cdot Moved_{Fac}^k \\
& + \sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y Path_Cost \cdot Temp_Road_{x,y} + \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^{M_k} MoveCost_{Mach}^{m,k} \cdot Moved_{Mach}^{m,k}
\end{aligned} \tag{1}$$

Gleichung (1) bildet die Zielfunktion des Planungsmodells für das Groblayout ab, deren Zielfunktionswert minimiert werden soll. Entscheidungsrelevant sind dabei verschiedene Kostenarten. Primär gehen die Transportkosten ein, die mit dem Materialfluss zwischen zwei Abteilungen k und l einhergehen. Des Weiteren werden Kosten proportional zur erzeugten Weglänge einbezogen, um die Platzierung der Wege nicht unrealistisch, sondern gerade ausreichend für die Transportaufgabe werden zu lassen. Ferner wird versucht, die bestehenden Strukturen bereits platzierter Maschinen und Abteilungen zu erhalten, indem Kosten mit der Verschiebung verbunden werden.

$$EX^k \geq Low_X_k \quad \forall k \in K \tag{2}$$

$$EX^k \leq Up_X_k \quad \forall k \in K \tag{3}$$

$$EY^k \geq Low_Y_k \quad \forall k \in K \tag{4}$$

$$EY^k \leq UP_Y_k \quad \forall k \in K \quad (5)$$

$$EX^k \cdot sl_{rough}^{ue} \cdot EY^k \cdot sl_{rough}^{ue} \geq A_{brutto,k} \quad \forall k \in K \quad (6)$$

Die Restriktionen (2) bis (6) schränken die variable, rechteckige Form der Abteilungen ein. Für die horizontale und vertikale Seitenlänge werden in Gleichungen (2) bis (5) untere bzw. obere Begrenzungen formuliert. (6) stellt sicher, dass die gewählte Ausdehnung auch den Flächenanforderungen nachkommt, indem die resultierende Fläche mindestens dem vorgegebenen Brutto-Flächenbedarf für Maschinen und Wege entspricht.

$$E_{g,kx,ky}^k = 1 - Greater\left(\sum_{f=1}^{g-1} E_{f,kx,ky}^k + \sum_{a=1}^{EX^k} \sum_{b=1}^{EY^k} E_{g,a,b}^k, 0\right) \quad \forall k \in K, g \in F_k, kx \in KX, ky \in KY \quad (7)$$

$$\sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y Pos_{x,y}^k = 1 \quad \forall k \in K \quad (8)$$

$$Loc_{f,x,y}^k = \sum_{\tilde{x}=1}^X \sum_{\tilde{y}=1}^Y Pos_{\tilde{x},\tilde{y}}^k \cdot E_{f,x+1-\tilde{x},y+1-\tilde{y}}^k \quad \forall k \in K, f \in F_k, x \in X, y \in Y \quad (9)$$

$$\sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y Loc_{f,x,y}^k = 1 \quad \forall k \in K, f \in F_k \quad (10)$$

Die Form der Abteilung wird in den Gleichungen (7) bis (10) dem Raster aus Einheitssegmenten in entsprechende Unterelemente f bzw. g unterteilt, die in ihrer Gesamtheit die Abteilung wiedergeben (Abbildung 4.8). (7) ordnet jedes Unterelement f einer Abteilung k eindeutig einer Zelle in den Koordinaten des lokalen Abteilungskoordinatensystems (kx, ky) zu. Dabei wird berücksichtigt, dass kein Unterelement auf einer bereits belegten Zelle platziert wird (erster Summand) und, dass die Positionierung nicht schon an anderer Stelle vorgenommen worden ist (zweiter Summand). Die Platzierung erfolgt willkürlich in den Abteilungsgrenzen EX^k und EY^k . Jede Abteilung wird eindeutig an einer Stelle platziert, wie Restriktion (8) fordert. Die linke, untere Ecke jeder Abteilung wird für jedes k einmal im Gebäude positioniert. Da die Variable Pos einen Bezugspunkt im lokalen Abteilungskoordinatensystem darstellt, kann darüber ein Übergang von Abteilungskordinaten in globale Koordinaten geschaffen werden. Um eine Überschneidung der Abteilungen untereinander zu vermeiden, müssen die Positionen der jeweiligen Unterelemente für jede Abteilung im globalen System bekannt sein. Dies wird über die Variable Loc_f erreicht, die in Gleichung (9) definiert wird. (10) stellt sicher, dass die Variable Loc_f für alle Unterelemente gesetzt wird.

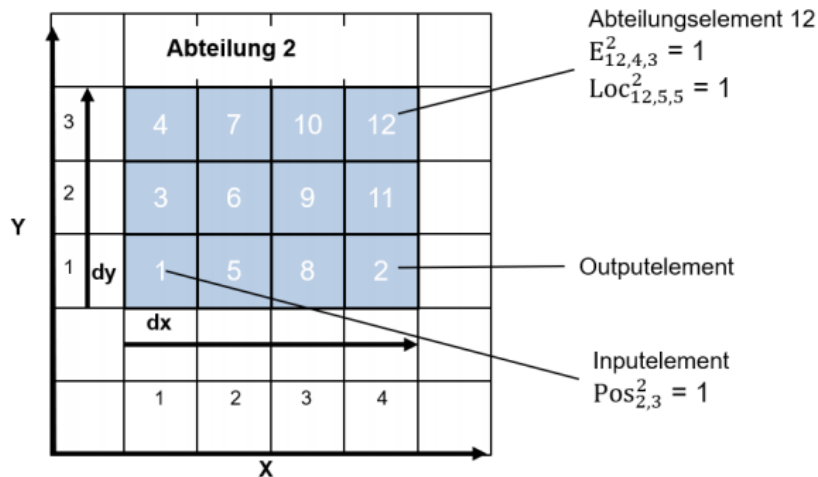


Abbildung 4.8: Abteilungselemente und -position

$$Occ_{Fac,x,y}^k = \sum_{f=1}^{F_{max}^k} Loc_{f,x,y}^k \quad \forall k \in K, x \in X, y \in Y \quad (11)$$

$$\sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y Occ_{Fac,x,y}^k \cdot Occ_{Fac,x,y}^l = 0 \quad \forall k, l \in K \text{ mit } k \neq l \quad (12)$$

$$\sum_{k=1}^K (Occ_{Fac,x,y}^k) + Rest_{x,y} + Road_{x,y} \leq 1 \quad \forall x \in X, y \in Y \quad (13)$$

Mit Blick auf das globale Koordinatensystem wird in den Nebenbedingungen (11) bis (13) eine Überschneidung der verschiedenen Abteilungen und Wegelemente verhindert. (11) definiert die Variable Occ_{Fac} , die für jedes Einheits-element angibt, ob dieses von der Abteilung k belegt ist. Im Kontrast zu dem vorherigen Gleichungsblock, der jede Abteilung gesondert betrachtet, wird in (12) eine Doppelbelegung aller Einheits-elemente durch zwei Abteilungen ausgeschlossen. Restriktion (13) ist fundamental für das gesamte Modell der Groblayoutplanung. In dieser werden die drei potentiellen Flächenarten, Transportflächen, Abteilungsflächen und Sperrflächen, gemeinsam betrachtet und für jedes Raster-element die Belegung von maximal einer dieser Flächenarten erlaubt. Ebenso kann das Einheits-element auch unbelegt, frei verfügbar bleiben.

$$EC_{Fac,ck}^k \cdot Occ_{Fac,x,y}^k = EC_{Fac,ck}^k \cdot Occ_{Fac,x,y}^k \cdot Cond_{x,y}^{ck} \quad \forall x \in X, y \in Y, k \in K, ck \in CK \quad (14)$$

Bedingung (14) bildet die Notwendigkeit ab, dass potentielle Anforderungen oder Verbote ck , die für jede Abteilung k im Vorfeld festgesetzt worden sind, auch von den belegten Gebäudeelementen erfüllt werden müssen. Ansonsten ist eine Platzierung der Abteilung mit ihren Unterelementen an dieser Stelle nicht gestattet.

$$Edge_{x,y}^k = \sum_{f=1}^{F_{max}^k} \sum_{\tilde{x}=1}^X \sum_{\tilde{y}=1}^Y Pos_{\tilde{x},\tilde{y}}^k \cdot E_{f,x+1-\tilde{x},y+1-\tilde{y}}^k \cdot \left(Greater(Ident(x,\tilde{x}) + Ident(y,\tilde{y}) + Ident(x,\tilde{x} + EX^k - 1) + Ident(y,\tilde{y} + EY^k - 1), 0) \right) \quad \forall k \in K, x \in X, y \in Y \quad (15)$$

$$\sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y In_{Fac,x,y}^k \cdot Edge_{x,y}^k = 1 \quad \forall k \in K \quad (16)$$

$$\sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y Out_{Fac,x,y}^k \cdot Edge_{x,y}^k = 1 \quad \forall k \in K \quad (17)$$

$$Loc_{1,x,y}^k = In_{Fac,x,y}^k \quad \forall k \in K, x \in X, y \in Y \quad (18)$$

$$Loc_{2,x,y}^k = Out_{Fac,x,y}^k \quad \forall k \in K, x \in X, y \in Y \quad (19)$$

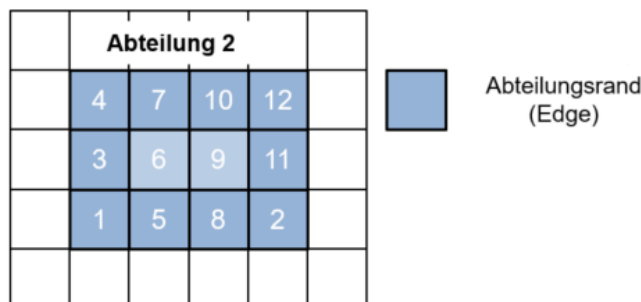


Abbildung 4.9: Potentielle Input- und Outputpositionen

Da nicht nur die Seitenlängen der Abteilungen, sondern auch die Position des jeweiligen Inputs und Outputs Teil des Optimierungsproblems sind, wird eine variable Platzierung am Abteilungsrand (Abbildung 4.9) ermöglicht. Dafür wird in (15) der Abteilungsrand als *Edge* für alle Abteilungselemente definiert, deren Koordinate in *x* und/oder in *y* Richtung der minimalen oder maximalen Ausdehnung der Abteilung in Globalkoordinaten entspricht. (16) und (17) verlangen die Zuordnung des Inputs und Outputs für jede Abteilung und grenzen diese Zuordnung auf den Abteilungsrand ein. In (18) und (19) wird die Zuweisung des Inputs zu dem ersten Unterelement $f = 1$ und des Outputs zu dem zweiten Unterelement $f = 2$ für jede Abteilung k vorgenommen, um im weiteren Modellverlauf eine eindeutige Verwendung für diese zwei Bezugspunkte zu gestatten.

$$\begin{aligned}
Moved_{Fac}^k = Greater & \left(\sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y Start_{Fac,x,y}^{Pos,k} \cdot (1 - Occ_{Fac,x,y}^k) \right. \\
& \left. + 1 - Ident(Start_{Fac}^{Hor,k}, EX^k) + 1 - Ident(Start_{Fac}^{Vert,k}, EY^k), 0 \right) \quad \forall k \in K \quad (20)
\end{aligned}$$

$$Fixed_{Fac}^k \cdot Moved_{Fac}^k = 0 \quad \forall k \in K \quad (21)$$

$$\begin{aligned}
Moved_{Mach}^{m,k} = Greater & \left(Start_{Mach}^{Hor,m,k} \cdot Start_{Mach}^{Ver,m,k} - \right. \\
& \sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y Start_{Mach}^{Hor,m,k} Start_{Mach}^{Ver,m,k} Start_{Mach,x,y}^{Pos,m,k} \cdot Occ_{Fac,x+\bar{x}-1,y+\bar{y}-1}^k \\
& + \sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y Start_{Mach}^{Hor,m,k} Start_{Mach}^{Ver,m,k} Start_{Mach,x,y}^{Pos,m,k} \cdot In_{Fac,x+\bar{x}-1,y+\bar{y}-1}^k \\
& \left. + \sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y Start_{Mach}^{Hor,m,k} Start_{Mach}^{Ver,m,k} Start_{Mach,x,y}^{Pos,m,k} \cdot Out_{Fac,x+\bar{x}-1,y+\bar{y}-1}^k, 0 \right) \\
& \forall k \in K, m \in M_k \quad (22)
\end{aligned}$$

$$Fixed_{Mach}^{m,k} \cdot Moved_{Mach}^{m,k} = 0 \quad \forall k \in K, m \in M_k \quad (23)$$

Sollten Abteilungen und Maschinen bereits vor Anwendung des Modells in der verfügbaren Fläche platziert sein, ist zu prüfen, ob im Rahmen der Layoutoptimierung eine Veränderung in Position oder Form erfolgt ist. Dafür wird in (20) geprüft, ob die Abteilung k im Vergleich zu einer potentiellen Startposition oder anfänglichen Ausdehnung in horizontale oder vertikale Richtung gleich geblieben ist oder abweicht. Für fixierte Abteilungen ist durch (21) keine Veränderung erlaubt. Für bestehende Maschinen m , die eindeutig einer Abteilung k zugewiesen sind, ist zwar im Feinlayout eine unregelmäßige Form zugelassen, aufgrund der unterschiedlichen Einheits-elemente wird ein minimales, umschließendes Rechteck betrachtet, für das die Position der linken, unteren Ecke und die Seitenlänge bekannt sind. Maschinen müssen im Feinlayout nicht verschoben werden, wenn die gesamte Rechteckfläche von der zugehörigen Abteilung eingeschlossen wird und es sich bei keinem der Rechteckelemente um das Abteilungsinput oder -output handelt (Gleichung (22)). Auch fixierte Maschinen dürfen nicht verschoben werden ((23)), was bei der Wahl der Abteilungsanordnung zu bedenken ist.

$$\sum_{i=1}^{I_{max}} \sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y Node_{Fac,x,y}^{Output,k,i} = 1 \quad \forall k \in K \quad (24)$$

$$\sum_{i=1}^{I_{max}} \sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y Node_{Fac,x,y}^{Input,k,i} = 1 \quad \forall k \in K \quad (25)$$

$$\sum_{i=1}^{I_{max}} Node_{Fac,x,y}^{Output,k,i} = Out_{Fac,x,y}^k \quad \forall k \in K, x \in X, y \in Y \quad (26)$$

$$\sum_{i=1}^{I_{max}} Node_{Fac,x,y}^{Input,k,i} = In_{Fac,x,y}^k \quad \forall k \in K, x \in X, y \in Y \quad (27)$$

(24) bis (27) setzen die Knoten für Abteilungsinput und -output (Abbildung 4.10). Die Knoten werden mittig einem Einheitselement zugeordnet. In (24) und (25) wird sichergestellt, dass für jede Abteilung k jeweils ein Input- und Outputknoten erstellt wird. Die Platzierung erfolgt anhand Bedingungen (26) und (27) genau an der Position des Input- und Outputelements der Abteilung.

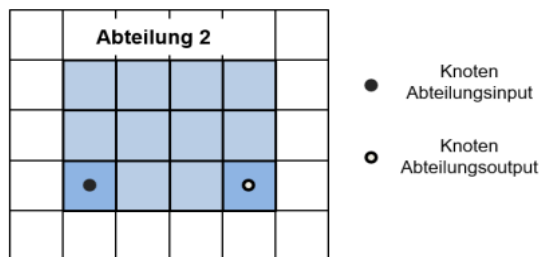


Abbildung 4.10: Position Abteilungsknoten

$$\sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y N_{i,x,y} \leq \sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y N_{i-1,x,y} \quad \forall i \in 2, \dots, I \quad (28)$$

$$N_{i,x,y} = \sum_{k=1}^K (Node_{Fac,x,y}^{Input,k,i} + Node_{Fac,x,y}^{Output,k,i}) + Node_{x,y}^{Corner,i} + Node_{x,y}^{Cross,i} \quad \forall i \in I, x \in X, y \in Y \quad (29)$$

$$\sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y N_{i,x,y} \leq \sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y N_{i-1,x,y} \quad \forall i \in 2, \dots, I \quad (28)$$

$$N_{i,x,y} = \sum_{k=1}^K (Node_{Fac,x,y}^{Input,k,i} + Node_{Fac,x,y}^{Output,k,i}) + Node_{x,y}^{Corner,i} + Node_{x,y}^{Cross,i} \quad \forall i \in I, x \in X, y \in Y \quad (29)$$

$$\sum_{i=1}^{I_{max}} N_{i,x,y} \leq 1 \quad \forall x \in X, y \in Y \quad (30)$$

$$\sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y N_{i,x,y} \leq 1 \quad \forall i \in I \quad (31)$$

Die Menge aller Knoten wird in der Variablen N zusammengefasst, die die separaten Knotendefinitionen vereint. Die Nummerierung der Knoten i ist eindeutig vorzunehmen, um den Verlauf der Kanten zwischen zwei Knoten (i, j) exakt zu modellieren. In Restriktion (28) wird formuliert, dass eine Knotenbezeichnung nur dann vergeben werden darf, wenn die vorgelagerte Zahl $i - 1$ bereits belegt ist. (29) verknüpft die Knotenvariable N mit den spezifischen Knotenarten. Diese umfassen Abteilungsinput- und -outputknoten, Eckknoten und Kreuzungsknoten. Ist das Einheitselement (x, y) von einem Knoten belegt, wird dieser eindeutig mit i gekennzeichnet. Gleichung (30) legt fest, dass jedes Einheitselement von genau einem Knoten egal welcher Art belegt werden darf, sodass Eck- und Kreuzungsknoten nur einmal erzeugt werden. Durch (31) wird garantiert, dass in der gesamten Planungsfläche

jede Knotennummer nur einmal vergeben wird, um die Eindeutigkeit zu erhalten.

$$\begin{aligned}
 LeftNode_{i,j} = & Ident\left(\sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y N_{i,x,y} \cdot y, \sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y N_{j,x,y} \cdot y\right) \cdot \\
 & Greater\left(\sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y N_{i,x,y} \cdot x, \sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y N_{j,x,y} \cdot x\right)
 \end{aligned} \quad \forall i, j \in I, j \neq i \quad (32)$$

$$\begin{aligned}
 RightNode_{i,j} = & Ident\left(\sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y N_{i,x,y} \cdot y, \sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y N_{j,x,y} \cdot y\right) \cdot \\
 & Greater\left(\sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y N_{j,x,y} \cdot x, \sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y N_{i,x,y} \cdot x\right)
 \end{aligned} \quad \forall i, j \in I, j \neq i \quad (33)$$

$$\begin{aligned}
 UpNode_{i,j} = & Ident\left(\sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y N_{i,x,y} \cdot x, \sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y N_{j,x,y} \cdot x\right) \cdot \\
 & Greater\left(\sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y N_{j,x,y} \cdot y, \sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y N_{i,x,y} \cdot y\right)
 \end{aligned} \quad \forall i, j \in I, j \neq i \quad (34)$$

$$\begin{aligned}
 BelowNode_{i,j} = & Ident\left(\sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y N_{i,x,y} \cdot x, \sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y N_{j,x,y} \cdot x\right) \cdot \\
 & Greater\left(\sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y N_{i,x,y} \cdot y, \sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y N_{j,x,y} \cdot y\right)
 \end{aligned} \quad \forall i, j \in I, j \neq i \quad (35)$$

$$\begin{aligned}
 Dist_i^{left} = & \min_{\forall j \in I, j \neq i} \left(LeftNode_{i,j} \cdot \left(\sum_{y=1}^Y \left(\sum_{x=1}^X N_{i,x,y} \cdot x \right) - \left(\sum_{\bar{x}=1}^X N_{j,\bar{x},y} \cdot \bar{x} \right) \right) \right. \\
 & \left. + (1 - LeftNode_{i,j} \cdot BigM) \right)
 \end{aligned} \quad \forall i \in I \quad (36)$$

$$\begin{aligned}
 Dist_i^{right} = & \min_{\forall j \in I, j \neq i} \left(RightNode_{i,j} \cdot \left(\sum_{y=1}^Y \left(\sum_{x=1}^X N_{j,x,y} \cdot x \right) - \left(\sum_{\bar{x}=1}^X N_{i,\bar{x},y} \cdot \bar{x} \right) \right) \right. \\
 & \left. + (1 - RightNode_{i,j} \cdot BigM) \right)
 \end{aligned} \quad \forall i \in I \quad (37)$$

$$Dist_i^{up} = \min_{\forall j \in I, j \neq i} \left(UpNode_{i,j} \cdot \left(\sum_{x=1}^X \left(\sum_{y=1}^Y N_{j,x,y} \cdot y \right) - \left(\sum_{\tilde{y}=1}^Y N_{i,x,\tilde{y}} \cdot \tilde{y} \right) \right) + (1 - UpNode_{i,j} \cdot BigM) \right) \quad \forall i \in I \quad (38)$$

$$Dist_i^{below} = \min_{\forall j \in I, j \neq i} \left(BelowNode_{i,j} \cdot \left(\sum_{x=1}^X \left(\sum_{y=1}^Y N_{i,x,y} \cdot y \right) - \left(\sum_{\tilde{y}=1}^Y N_{j,x,\tilde{y}} \cdot \tilde{y} \right) \right) + (1 - BelowNode_{i,j} \cdot BigM) \right) \quad \forall i \in I \quad (39)$$

$$Neigh_{i,j}^{left} = LeftNode_{i,j} \cdot Ident \left(\sum_{y=1}^Y \left(\sum_{x=1}^X N_{i,x,y} \cdot x - \sum_{\tilde{x}=1}^X N_{j,\tilde{x},y} \cdot \tilde{x} \right), Dist_i^{left} \right) \cdot \left(1 - \sum_{k=1}^K \left(\sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y Node_{Fac,x,y}^{Input,k,i} \cdot \sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y Node_{Fac,x,y}^{Output,k,j} \right) \right) \cdot \left(1 - \sum_{k=1}^K \left(\sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y Node_{Fac,x,y}^{Input,k,j} \cdot \sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y Node_{Fac,x,y}^{Output,k,i} \right) \right) \cdot \left(1 - \sum_{y=1}^Y \sum_{xx=1}^X \sum_{xxx=1}^{xx-1} N_{i,xx,y} \cdot N_{j,xxx,y} \cdot Greater \left(\sum_{k=1}^K \sum_{x=xxx+1}^{xx-1} Occ_{Fac,x,y}^k, 0 \right) \right) \quad \forall i, j \in I, j \neq i \quad (40)$$

$$Neigh_{i,j}^{right} = RightNode_{i,j} \cdot Ident \left(\sum_{y=1}^Y \left(\sum_{x=1}^X N_{j,x,y} \cdot x - \sum_{\tilde{x}=1}^X N_{i,\tilde{x},y} \cdot \tilde{x} \right), Dist_i^{right} \right) \cdot \left(1 - \sum_{k=1}^K \left(\sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y Node_{Fac,x,y}^{Input,k,i} \cdot \sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y Node_{Fac,x,y}^{Output,k,j} \right) \right)$$

$$\begin{aligned}
& \cdot \left(1 - \sum_{k=1}^K \left(\sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y \text{Node}_{Fac,x,y}^{Input,k,j} \cdot \sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y \text{Node}_{Fac,x,y}^{Output,k,i} \right)\right) \\
& \cdot \left(1 - \sum_{y=1}^Y \sum_{xx=1}^X \sum_{xxx=1}^{xx-1} N_{j,xx,y} \cdot N_{i,xxx,y} \cdot \text{Greater} \left(\sum_{k=1}^K \sum_{x=xxx+1}^{xx-1} \text{Occ}_{Fac,x,y}^k, 0 \right) \right) \quad \forall i, j \in I, j \neq i \quad (41)
\end{aligned}$$

$$\text{Neigh}_{i,j}^{above} = \text{UpNode}_{i,j} \cdot \text{Ident} \left(\sum_{x=1}^X \left(\sum_{y=1}^Y N_{j,x,y} \cdot y - \sum_{\bar{y}=1}^Y N_{i,x,\bar{y}} \cdot \bar{y} \right), \text{Dist}_i^{up} \right)$$

$$\begin{aligned}
& \cdot \left(1 - \sum_{k=1}^K \left(\sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y \text{Node}_{Fac,x,y}^{Input,k,i} \cdot \sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y \text{Node}_{Fac,x,y}^{Output,k,j} \right)\right) \\
& \cdot \left(1 - \sum_{k=1}^K \left(\sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y \text{Node}_{Fac,x,y}^{Input,k,j} \cdot \sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y \text{Node}_{Fac,x,y}^{Output,k,i} \right)\right) \\
& \cdot \left(1 - \sum_{x=1}^X \sum_{yy=1}^Y \sum_{yyy=1}^{yy-1} N_{j,x,yy} \cdot N_{i,x,yyy} \cdot \text{Greater} \left(\sum_{k=1}^K \sum_{y=yyy+1}^{yy-1} \text{Occ}_{Fac,x,y}^k, 0 \right) \right) \quad \forall i, j \in I, j \neq i \quad (42)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Neigh_{i,j}^{below} &= UpNode_{i,j} \cdot Ident \left(\sum_{x=1}^X \left(\sum_{y=1}^Y N_{i,x,y} \cdot y - \sum_{\bar{y}=1}^Y N_{j,x,\bar{y}} \cdot \bar{y} \right), Dist_i^{below} \right) \\
 &\cdot \left(1 - \sum_{k=1}^K \left(\sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y Node_{Fac,x,y}^{Input,k,i} \cdot \sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y Node_{Fac,x,y}^{Output,k,j} \right) \right) \\
 &\cdot \left(1 - \sum_{k=1}^K \left(\sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y Node_{Fac,x,y}^{Input,k,j} \cdot \sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y Node_{Fac,x,y}^{Output,k,i} \right) \right) \\
 &\cdot \left(1 - \sum_{x=1}^X \sum_{yy=1}^Y \sum_{yyy=1}^{yy-1} N_{i,x,yy} \cdot N_{j,x,yyy} \cdot Greater \left(\sum_{k=1}^K \sum_{yy=yyy+1}^{yy-1} Occ_{Fac,x,y}^k, 0 \right) \right) \quad \forall i, j \in I, j \neq i \quad (43)
 \end{aligned}$$

$$Neigh_{i,j} = Neigh_{i,j}^{right} + Neigh_{i,j}^{left} + Neigh_{i,j}^{above} + Neigh_{i,j}^{below} \quad \forall i, j \in I \text{ mit } i \neq j \quad (44)$$

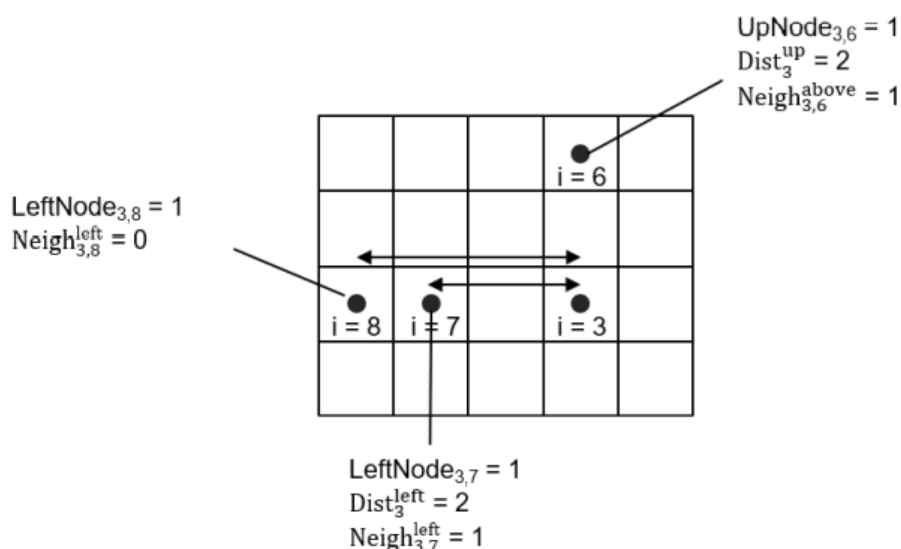


Abbildung 4.11: Bestimmung der nächsten Nachbarknoten

Für die eindeutig erzeugten und positionierten Knotenpunkte wird in den Restriktionen (32) bis (44) die Nachbarschaft untereinander untersucht (Abbildung 4.11). Verbunden mit der Annahme, dass Kanten und damit die Wege immer orthogonal verlaufen, wird in jede der vier Richtungen der nächstgelegene Knoten j zum Knoten i ermittelt. Dafür wird für die jeweilige Richtung eine Raumkoordinate konstant gelassen, während die andere im passenden Intervall verändert wird. Gleichungen (32) bis (35) weisen den Knoten j als Nachbarknoten der jeweiligen Richtung von i aus, indem die jeweiligen Knotenkoordinaten verglichen werden. Für linksseitige Nachbarn wird beispielsweise geschaut, ob der Knoten j auf derselben Höhe (y bleibt konstant) und links von dem Knoten i liegt (im Intervall $1 \leq x_j \leq x_i$). (36) bis (39) bestimmen die minimale Distanz aller Knoten j in jede Richtung. Dabei wird das Minimum aller Entfernungen der Knotenmenge gebildet, die zu den Nachbarknoten in der betrachteten Richtung zählen. Falls der Knoten j keinen relevanten Nachbarn darstellt,

wird diesem eine ausreichend große, ganze Zahl $BigM$ zugeordnet, um in den anschließenden Gleichungen (40) bis (43) die Logik nicht ungewollt zu beeinträchtigen. In diesen wird der nächstgelegene, benachbarte Knoten bestimmt. So wird in (40) beispielsweise die Entfernung zwischen dem untersuchten Knoten i und allen Knoten j ermittelt, die linksseitige Nachbarn sind. Die berechnete Distanz dieses Knotenpaars wird anschließend mit der minimalen Distanz aller linken Nachbarn verglichen, um den nächstgelegenen benachbarten Knoten zu bestimmen. Selbiges wird für rechts (41), oben (42) und unten (43) benachbarte Knoten ausgeführt. In (44) wird abschließend die Menge aller nächstgelegenen Knoten bestimmt.

$$\sum_{k=1}^K \sum_{l=1, l \neq k}^K \sum_{w=1}^{W_{max}} Path_{k,l,i,j}^w + Path_{k,l,j,i}^w \leq Neigh_{i,j} \quad \forall i, j \in I \text{ mit } i < j \quad (45)$$

$$\sum_{i=1}^{I_{max}} \sum_{j=1, j \neq i}^{I_{max}} \sum_{w=1}^{W_{max}} Path_{k,l,i,j}^w \leq Flow_{k,l} \quad \forall k, l \in K \text{ mit } k \neq l \quad (46)$$

$$\sum_{i=1}^{I_{max}} \sum_{j=1, j \neq i}^{I_{max}} Path_{k,l,i,j}^w \leq 1 \quad \forall k, l \in K \text{ mit } k \neq l, w \in W_{max} \quad (47)$$

$$\sum_{j=1}^{I_{max}} Path_{k,l,i,j}^1 = Flow_{k,l} \cdot \sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y Node_{Fac,x,y}^{Output,k,i} \quad \forall k, l \in K \text{ mit } k \neq l, i \in I \quad (48)$$

$$\sum_{j=1}^{I_{max}} Path_{k,l,j,i}^{w-1} \cdot \left(1 - \sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y Node_{Fac,x,y}^{Input,l,i}\right) = \sum_{j=1}^{I_{max}} Path_{k,l,i,j}^w \quad \forall k, l \in K \text{ mit } k \neq l, i \in I, w \in 2, \dots, W_{max} \quad (49)$$

$$\sum_{j=1}^{I_{max}} \sum_{w=1}^{W_{max}} Path_{k,l,j,i}^w \geq Flow_{k,l} \cdot \sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y Node_{Fac,x,y}^{Input,l,i} \quad \forall k, l \in K \text{ mit } k \neq l, i \in I \quad (50)$$

$$\begin{aligned} & \sum_{j=1, j \neq i}^{I_{max}} \sum_{w=1}^{W_{max}} \sum_{k=1}^K \sum_{l=1, l \neq k}^L (Path_{k,l,j,i}^w - Path_{k,l,i,j}^w) = \\ & \sum_{k=1}^K \sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y (Node_{Fac,x,y}^{Input,k,i} \cdot \sum_{l=1, l \neq k}^K Flow_{l,k} - Node_{Fac,x,y}^{Output,k,i} \cdot \sum_{l=1, l \neq k}^K Flow_{k,l}) \quad \forall i \in I \quad (51) \end{aligned}$$

Die Restriktionen (45) bis (51) stellen den Transport zwischen zwei Abteilungen sicher (Abbildung 4.12). Da im Groblayout nur Transporte zwischen verschiedenen Abteilungen k und l relevant sind, finden Transporte innerhalb keine Beachtung. Außerdem werden alle Transporte zwischen einem Abteilungspaar zusammengefasst und auf das Transportmittel mit größter Arbeitsgangbreite bezogen. Die Wahl der Reihenfolge der Indizes i, j bzw. j, i suggeriert die Richtung einer Kantenbewegung zwischen den beiden Knoten. Letztlich wird der Materialtransport zwischen zwei Abteilungen in Segmente oder Abschnitte w unterteilt, die als aneinandergereihte Kanten den gesamten Transportfluss bewerkstelligen, beginnend

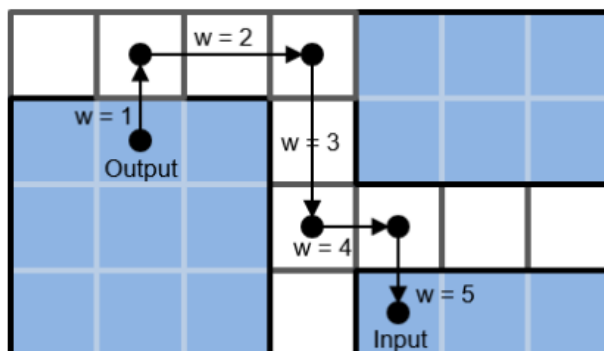


Abbildung 4.12: Pfadsegmente zwischen Abteilungsoutput und -input

beim Output der Abteilung k , verlaufend zwischen den platzierten Knoten auf kostenminimierende und realisierbare Weise, und endend am Input der Abteilung l . Gleichung (45) lässt derartige, erzeugte Wegsegmente nur zwischen zwei direkt benachbarten Knoten zu. Außerdem werden durch (46) alle potentiellen Pfadvariablen für Abteilungskombinationen ohne Flussbeziehung direkt auf 0 gesetzt. Der Index w beschreibt die Stetigkeit und Reihenfolge der aneinandergereihten Wegsegmente. Daher muss der Index w eindeutig vergeben werden. Dieser Eindeutigkeit widmet sich (47). Um nun den korrekten Verlauf und die Stetigkeit des Materialflusses zwischen Abteilung k und l zu sichern, bilden (48) bis (50) die potentiellen Ausprägungen ab. In (48) wird der Start des Transportvorgangs mit $w = 1$ an den Outputknoten i der Abteilung k verlegt, sofern eine Transportbeziehung vorliegt. Für die nachfolgenden Wegsegmente wird in (49) die Stetigkeit betrachtet. Das Wegsegment $w - 1$ endet an dem Knoten i , an dem das nächste Segment w startet. Ausgenommen ist der Fall, wenn es sich bei dem Knoten i um den Zielknoten, den Inputknoten der Abteilung l handelt. Für letzteren Fall wird Restriktion (50) wirksam, die sicherstellt, dass der Inputknoten von einem der Wegelemente erreicht wird. In Kombination mit (49) wird zudem erreicht, dass alle nachfolgenden Wegsegmente auf 0 gesetzt werden, der Transport also tatsächlich beim Input beendet wird. Um schließlich die Transportvorgänge nicht vereinzelt zu modellieren, sondern eine gemeinsame Wegenutzung zu gestatten, wird in (51) eine Knotenbilanz erstellt. Die eingehenden und ausgehenden Ströme müssen im Ausgleich stehen, außer es handelt sich bei dem Knoten i um eine Quelle (Output) oder Senke (Input). Es werden unabhängig von Start- und Zielabteilung für jeden Knoten i alle Segmente betrachtet, für die der Knoten Teil des Transportweges ist.

$$\begin{aligned}
 Aisle_Width_{Node,i}^{max} &\geq \sum_{v=1}^V Greater\left(\sum_{j=1, j \neq i}^{I_{max}} \sum_{w=1}^{W_{max}} (Path_{k,l,j,i}^w + Path_{k,l,i,j}^w), 0\right) \cdot \\
 &Vehicle_{k,l,v} \cdot Aisle_Width_v \\
 &\forall k, l \in K \text{ mit } k \neq l, i \in I
 \end{aligned} \tag{52}$$

$$Aisle_Width_{Arc,i,j}^{max} \geq \sum_{v=1}^V Greater\left(\sum_{w=1}^{W_{max}} (Path_{k,l,j,i}^w + Path_{k,l,i,j}^w), 0\right) \cdot Vehicle_{k,l,v} \cdot Aisle_Width_v$$

$$\forall k, l \in K \text{ mit } k \neq l, i, j \in I \text{ mit } i \neq j \quad (53)$$

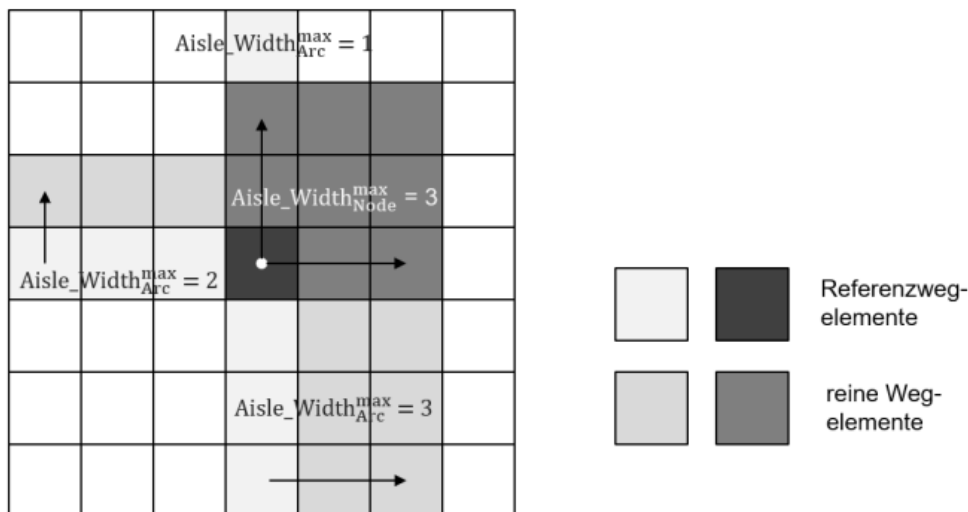


Abbildung 4.13: Zusammenhang maximale Kanten- und Knotenausdehnung

Zwar ist der Transportweg zwischen den Abteilungen über das Netz aus Knoten und Kanten gegeben. Jedoch wird dieser abhängig von der Transportbeziehung von unterschiedlichen Transportmitteln v durchgeführt. Diese variieren in ihrer erforderlichen Arbeitsgangbreite, sodass der Weg für das Transportmittel mit der größten erforderlichen Arbeitsgangbreite auszulegen ist. Für alle weiteren Fördermittel sind die Anforderungen implizit erfüllt. Nebenbedingungen (52) und (53) berechnen daher diese benötigte Wegbreite sowohl für jeden Knoten, bei dem alle ein- und ausgehenden Transporte relevant sind, als auch für die Wege (Kanten) zwischen den Knoten (Abbildung 4.13). Eine Veränderung der Wegbreite kann nur an Kreuzungsknotenpunkten erfolgen, da dort die operierenden Transportmittel den Weg wechseln können. Eckknoten bewirken nur eine Richtungsänderung, die Wegbreite des ein- und ausgehenden Weges bleibt gleich.

$$\sum_{a=1}^{Aisle_Width_{Node,i}^{max}} \sum_{b=1}^{Aisle_Width_{Node,i}^{max}} (Node_{x,y}^{Corner,i} + Node_{x,y}^{Cross,i}) \leq \sum_{a=1}^{Aisle_Width_{Node,i}^{max}} \sum_{b=1}^{Aisle_Width_{Node,i}^{max}} Road_{x+a-1,y+b-1}$$

$$\forall x \in X, y \in Y, i \in I \quad (54)$$

$$\begin{aligned}
\sum_{a=1}^{\lceil \frac{Aisle_Width_{Node,i}^{max}}{2} \rceil} Node_{Fac,x,y}^{Output,k,i} &\leq \sum_{a=1}^{\lceil \frac{Aisle_Width_{Node,i}^{max}}{2} \rceil} \sum_{\tilde{x}=1}^X \sum_{\tilde{y}=1}^Y \left(Pos_{\tilde{x},\tilde{y}}^k \cdot Occ_{Fac,x+a-1,y}^k \cdot (Ident(y,\tilde{y}) \right. \\
&\quad + Ident(y,\tilde{y} + EY^k - 1)) + Pos_{\tilde{x},\tilde{y}}^k \cdot Occ_{Fac,x,y+a-1}^k \\
&\quad \cdot (Ident(x,\tilde{x}) + Ident(x,\tilde{x} + EX^k - 1)) \\
&\quad \left. \cdot (1 - (Ident(y,\tilde{y}) + Ident(y,\tilde{y} + EY^k - 1))) \right)
\end{aligned} \tag{55}$$

$$\forall x \in X, y \in Y, k \in K, i \in I$$

$$\begin{aligned}
\sum_{a=1}^{\lceil \frac{Aisle_Width_{Node,i}^{max}}{2} \rceil} Node_{Fac,x,y}^{Input,k,i} &\leq \sum_{a=1}^{\lceil \frac{Aisle_Width_{Node,i}^{max}}{2} \rceil} \sum_{\tilde{x}=1}^X \sum_{\tilde{y}=1}^Y \left(Pos_{\tilde{x},\tilde{y}}^k \cdot Occ_{Fac,x+a-1,y}^k \cdot (Ident(y,\tilde{y}) \right. \\
&\quad + Ident(y,\tilde{y} + EY^k - 1)) + Pos_{\tilde{x},\tilde{y}}^k \cdot Occ_{Fac,x,y+a-1}^k \\
&\quad \cdot (Ident(x,\tilde{x}) + Ident(x,\tilde{x} + EX^k - 1)) \\
&\quad \left. \cdot (1 - (Ident(y,\tilde{y}) + Ident(y,\tilde{y} + EY^k - 1))) \right)
\end{aligned} \tag{56}$$

$$\forall x \in X, y \in Y, k \in K, i \in I$$

Die ermittelte, maximal benötigte Knotenbreite wird in den Bedingungen (54) bis (56) auf die verschiedenen Knotenformen angewandt. Parallel dazu werden an den von den Kreuzungs- und Eckknoten belegten Elementen die ersten Wegflächen definiert. (54) bestimmt dafür, ausgehend von der Position der Kreuzungs- und Eckknoten, die quadratische Ausdehnung von $Aisle_Width_{Node}^{max}$ und legt an diesen Wegelemente *Road* fest. Da die Abteilungsinput- und -outputknoten innerhalb der Abteilung liegen und daher im Groblayout als Abteilungsfläche und nicht als Wegfläche vermerkt sind, sind diese gesondert zu betrachten. Gleichungen (55) und (56) stellen dabei im Vorgriff auf das Feinlayout sicher, dass die Ausdehnung der Input- und Outputknoten innerhalb der Abteilungsgrenzen liegen. Liegt dieser am oberen oder unteren Rand, ist entsprechend der getroffenen Annahme eine Ausdehnung nach rechts angedacht, während es in y-Richtung bei einem Einheits-element bleibt. Liegt der Knoten am linken oder rechten Abteilungsrand und nicht in einer Ecke (in diesem Fall wird das Verfahren für den oberen und unteren Rand priorisiert) erfolgt eine Ausbreitung in positive y-Richtung (nach oben). Die Breite in x-Richtung verbleibt bei einem Einheits-element. Da die Arbeitsgangbreite für einen bidirektionalen Verkehr ausgelegt ist, ist jeweils über die Hälfte der Knotenausdehnung zu summieren.

$$\begin{aligned}
\sum_{\tilde{i}=1}^{I_{max}} Node_{x,y}^{Cross,\tilde{i}} &> N_{i,x,y} \cdot Greater \left(Road_{x+Aisle_Width_{Node,i}^{max}}^{Ref} + Road_{x,y+Aisle_Width_{Node,i}^{max}}^{Ref} \right. \\
&\quad \left. + Road_{x-1,y}^{Ref} + Road_{x,y-1}^{Ref}, 2 \right) \cdot \left(1 - \sum_{k=1}^K Occ_{Fac,x,y}^k \right)
\end{aligned} \tag{57}$$

$$\forall x \in X, y \in Y, i \in I$$

$$\begin{aligned}
 & 2 + \sum_{\bar{i}=1}^{I_{max}} Node_{x,y}^{Corner,\bar{i}} \geq N_{i,x,y} \cdot \left(Ident(Road_{x+Aisle_Width_{Node,i}^{max}}^{Ref} + Road_{x,y+Aisle_Width_{Node,i}^{max}}^{Ref} \right. \\
 & + Road_{x-1,y}^{Ref} + Road_{x,y-1}^{Ref}, 2) + Ident(Road_{x,y-1}^{Ref} + Road_{x,y+Aisle_Width_{Node,i}^{max}}^{Ref}, 1) \\
 & \left. + Ident(Road_{x-1,y}^{Ref} + Road_{x+Aisle_Width_{Node,i}^{max}}^{Ref}, 1) \right) \cdot \left(1 - \sum_{k=1}^K Occ_{Fac,x,y}^k \right) \\
 & \qquad \qquad \qquad \forall x \in X, y \in Y, i \in I \quad (58)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 In_{Fac,x,y}^k + Out_{Fac,x,y}^k \leq & (In_{Fac,x,y}^k + Out_{Fac,x,y}^k) \cdot \left(\sum_{\bar{i}=1}^{I_{max}} Node_{x-Aisle_Width_{Node,i}^{max}}^{Corner,\bar{i}} + Node_{x-Aisle_Width_{Node,i}^{max}}^{Cross,\bar{i}} + \right. \\
 & Node_{x+Aisle_Width_{Node,\bar{i}}^{max}}^{Corner,\bar{i}} + Node_{x+Aisle_Width_{Node,\bar{i}}^{max}}^{Cross,\bar{i}} + Node_{x,y-Aisle_Width_{Node,i}^{max}}^{Corner,\bar{i}} + Node_{x,y-Aisle_Width_{Node,i}^{max}}^{Cross,\bar{i}} + \\
 & \left. Node_{x,y+Aisle_Width_{Node,\bar{i}}^{max}}^{Corner,\bar{i}} + Node_{x,y+Aisle_Width_{Node,\bar{i}}^{max}}^{Cross,\bar{i}} \right) \cdot N_{i,x,y} \qquad \qquad \qquad \forall x \in X, y \in Y, k \in K \quad (59)
 \end{aligned}$$

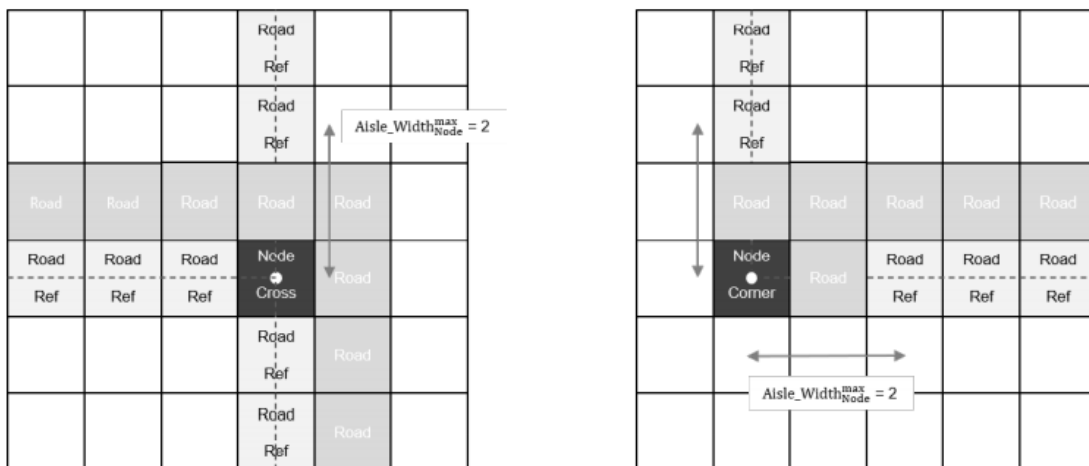


Abbildung 4.14: Platzierung Kreuzungs- und Eckknoten

Bisher war die Position der Kreuzungs- und Eckknotenpunkte als bekannt angenommen worden. Die tatsächliche Platzierung erfolgt allerdings erst in (57) respektive (58). Dort wird die Lage der Knoten an die umgebenden Elemente geknüpft, speziell an $Road^{Ref}$ (siehe Abbildung 4.14). Diese Variable spiegelt das Bezugswegenetz wider, aus dem sich das finale Wegenetz mit der korrekten Breite entwickelt. Das Referenznetz spannt sich zwischen den ursprünglichen Knoten unter Vernachlässigung der Knotenausdehnung auf und bildet zunächst ein Wegenetz aus, das alle Transportaufgaben erfüllt, jedoch nur eine Breite von einem Einheitsselement besitzt (Transportmitteleinfluss wird vernachlässigt). Da in (13) eine Überschneidung der Abteilungsflächen und Wegflächen vermieden wird, kann ausgehend von diesem Referenznetz ein realisierbares Layout abgeleitet werden.

Um an einer Stelle einen Kreuzungsknoten zu positionieren, muss dieser von mindestens

drei Referenzwegelementen bzw. Abteilungsinput oder -output umgeben sein (57). Dafür wird das nächstgelegene Einheitselement in alle vier Richtungen, abgesehen von der Knotenausdehnung ($Aisle_Width_{Node}^{max}$), untersucht. Für den Eckknoten wird in (58) geprüft, ob diese Stelle (abgesehen von der Knotenausdehnung) von genau zwei Referenzwegelementen oder Input bzw. Output umgeben ist. Darüber hinaus dürfen diese beiden Elemente nicht geradlinig liegen, d.h. es muss eine Richtungsänderung vorliegen. Demzufolge wird geprüft, ob beide Umgebungselemente denselben x- oder y-Wert aufweisen.

Da die Knoten, die dem Abteilungsinput und -output zugeordnet sind, innerhalb der Abteilung liegen und zunächst für das sich aufbauende Wegenetz kein Bezugspunkt für den weitergehenden Wegverlauf vorliegt, ist sicherzustellen, dass angrenzend an Abteilungsinput und -output ein Kreuzungs- oder Eckknoten verortet ist (Abbildung 4.15). In Gleichung (59) wird daher im Prinzip die Aktivierung der Transportpfadbildung vorgenommen.



Abbildung 4.15: An Abteilungsinput und -output grenzt immer ein Eck- oder

$$\sum_{i=1}^{I_{max}} N_{i,x,y} \leq Road_{x,y}^{Ref} \quad \forall x \in X, y \in Y \quad (60)$$

$$Road_{x,y,i,j}^{Ref} = Greater\left(\sum_{k=1}^K \sum_{l=1, l \neq k}^K \sum_{w=1}^{W_{max}} (Path_{k,l,j,i}^w + Path_{k,l,i,j}^w), 0\right) \cdot$$

$$\left(Neigh_{i,j}^{right} \cdot Greater\left(x \cdot \sum_{\tilde{x}=1}^{x+1-Aisle_Width_{Node,i}^{max}} N_{i,\tilde{x},y}, \sum_{\tilde{x}=1}^{x-1} N_{i,\tilde{x},y} \cdot \tilde{x} + Aisle_Width_{Node,i}^{max} - 1\right)$$

$$\cdot Greater\left(\sum_{\tilde{x}=x+1}^X N_{j,\tilde{x},y} \cdot \tilde{x}, x\right)$$

$$+ Neigh_{i,j}^{left} \cdot Greater\left(x \cdot \sum_{\tilde{x}=1}^{x+1-Aisle_Width_{Node,j}^{max}} N_{j,\tilde{x},y}, \sum_{\tilde{x}=1}^{x-1} N_{j,\tilde{x},y} \cdot \tilde{x} + Aisle_Width_{Node,j}^{max} - 1\right)$$

$$\cdot Greater\left(\sum_{\tilde{x}=x+1}^X N_{i,\tilde{x},y} \cdot \tilde{x}, x\right)$$

$$\begin{aligned}
& + Neigh_{i,j}^{above} \cdot Greater(y \cdot \sum_{\tilde{y}=1}^{y+1-Aisle_Width_{Node,i}^{max}} N_{i,x,\tilde{y}} \cdot \tilde{y} + Aisle_Width_{Node,i}^{max} - 1) \\
& \cdot Greater\left(\sum_{\tilde{y}=y+1}^Y N_{j,x,\tilde{y}} \cdot \tilde{y}, y\right) \\
& + Neigh_{i,j}^{below} \cdot Greater(y \cdot \sum_{\tilde{y}=1}^{y+1-Aisle_Width_{Node,j}^{max}} N_{j,x,\tilde{y}} \cdot \tilde{y} + Aisle_Width_{Node,j}^{max} - 1) \\
& \cdot Greater\left(\sum_{\tilde{y}=y+1}^Y N_{i,x,\tilde{y}} \cdot \tilde{y}, y\right)
\end{aligned}
\quad \forall x \in X, y \in Y, i, j \in I \text{ mit } i \neq j \quad (61)$$

$$Road_{x,y}^{Ref} \geq Greater\left(\sum_{i=1}^{I_{max}} \sum_{j=1, j \neq i}^{I_{max}} Road_{x,y,i,j}^{Ref}, 0\right) \quad \forall x \in X, y \in Y \quad (62)$$

$$Road_{x,y}^{Ref} \cdot \left(1 - \left(\sum_{k=1}^K In_{Fac,x,y}^k + Out_{Fac,x,y}^k\right)\right) \leq Road_{x,y} \quad \forall x \in X, y \in Y \quad (63)$$

In den Gleichungen (60) bis (63) wird das Referenzwegenetz, aus dem die Position der Kreuzungs- und Eckknoten sowie die Gangbreiten hergeleitet werden, definiert (Abbildung 4.15). Einerseits bildet jedes Einheitselement mit Knoten i einen Referenzweg (60). Wichtig anzumerken ist an dieser Stelle, dass Abteilungsinput und -output weiterhin als Abteilungs- und nicht als Wegfläche betrachtet werden. Die Referenzwege werden im Verlaufe des Groblayoutmodells nicht vollständig in ein tatsächliches Wegelement überführt.

Für die Referenzkanten werden in (61) zwischen den Knoten Referenzwege definiert. Dafür werden je nach Nachbarschaftsbeziehung der Knoten i und j die Einheitselemente zwischen den beiden Knoten (ausgenommen die Knotenausdehnung) betrachtet. Für den Fall, dass der Knoten j beispielsweise rechts vom Knoten i benachbart ist, werden alle Elementarzellen mit selber y -Koordinate und x -Koordinate, die rechts vom Knoten (inklusive Ausdehnung) i und links vom Knoten j liegen, als Referenzwegelement definiert. Die Knoten für sich sind, wie oben beschrieben, bereits über Restriktion (60) abgedeckt. Auf diese Weise wird für jede Knotenkombination (i, j) bzw. damit verknüpfte Kante der Referenzweg definiert. Die spezifische Einführung des Referenzweges für das Knotenpaar wird erforderlich, da für jede Kante eine individuelle Wegbreite gegeben ist. Diese wird in (65) behandelt. Um die Referenzobjekte für die Knotendefinition zu generalisieren, werden diese in (62) der allgemeinen Menge der Referenzwege zugeordnet. (63) stellt sicher, dass die Referenzwege nur an notwendigen Stellen gebildet werden, indem diese mit Ausnahme von Abteilungsinput und -output an ein Wegelement gebunden werden, mit deren Erzeugung Kosten einhergehen.

$$Perm_Road_{x,y} \leq Road_{x,y} \quad \forall x \in X, y \in Y \quad (64)$$

$$Aisle_Width_{Arc,i,j}^{max} \cdot \sum_{\bar{x}=1}^X \sum_{\bar{y}=1}^Y Road_{\bar{x},\bar{y},i,j}^{Ref} \leq \sum_{\bar{x}=1}^X \sum_{\bar{y}=1}^Y \sum_{a=1}^{Aisle_Width_{Arc,i,j}^{max}} Road_{\bar{x},\bar{y},i,j}^{Ref} \cdot \\ ((Neigh_{i,j}^{right} + Neigh_{i,j}^{left}) \cdot Road_{\bar{x},\bar{y}-1+a} + (Neigh_{i,j}^{above} + Neigh_{i,j}^{below}) \cdot Road_{\bar{x}-1+a,\bar{y}}) \\ \forall i, j \in I \text{ mit } i \neq j \quad (65)$$

$$Road_{x,y} - Perm_Road_{x,y} = Temp_Road_{x,y} \quad \forall x \in X, y \in Y \quad (66)$$

Die tatsächliche Bildung der (temporären) Wegflächen bzw. Wegelemente *Road* aufbauend auf den Bezugselementen erfolgt neben der bereits vorgestellten Restriktion (54), die die Knotenflächen für Kreuzungs- und Eckknoten als Wegflächen definiert, in den Nebenbedingungen (64) bis (66). Allgemein wird zwischen permanenten Wegelementen, die bereits im Voraus fixiert und daher als Wegfläche vorgegeben sind, und temporären Wegelementen, die im Rahmen des Optimierungsmodells ausgebildet werden, um den Transport zu ermöglichen, unterschieden. In (64) werden Positionen permanenter Wegelemente in allgemeine Wegelemente überführt. Gleichung (65) verbreitert die Referenzwege zwischen zwei Knoten auf die maximale, erforderliche Arbeitsgangbreite (siehe Abbildung 4.13) und definiert alle Einheits-elemente als Wegfläche. Dabei wird wiederum nach Nachbarschaft entschieden, ob der Weg nach oben (linke oder rechte Nachbarn) oder nach rechts (obere oder untere Nachbarn) ausgehend von dem Referenzweg ausgedehnt wird. Restriktion (66) leitet aus den Wegflächen abzüglich derer, die ohnehin fixiert sind, die temporären Wege ab. Diese finden Eingang in die Zielfunktion (1), wo die Wegbildung mit variablen Kosten (geknüpft an die Zahl der temporären Wegezelle) verbunden ist.

$$d_{i,j} = \sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y Neigh_{i,j}^{left} \cdot (N_{i,x,y} \cdot x - N_{j,x,y} \cdot x) + Neigh_{i,j}^{right} \cdot (N_{j,x,y} \cdot x - N_{i,x,y} \cdot x) \\ + Neigh_{i,j}^{above} \cdot (N_{j,x,y} \cdot y - N_{i,x,y} \cdot y) + Neigh_{i,j}^{below} \cdot (N_{i,x,y} \cdot y - N_{j,x,y} \cdot y) \\ \forall i, j \in I, j \neq i \quad (67)$$

$$dist_{k,l} \geq \sum_{w=1}^{W_{max}} \sum_{i=1}^{I_{max}} \sum_{j=1, j \neq i}^{I_{max}} d_{i,j} \cdot Path_{k,l,i,j}^w \quad \forall k, l \in K \text{ mit } k \neq l \quad (68)$$

In (1) wird zusätzlich versucht, die Transportdistanz über alle Transportvorgänge zu minimieren, die ebenso mit einem Kostensatz gewichtet wird. Die Distanz, die zwischen zwei Abteilungen zurückgelegt wird, wird entlang der entwickelten Wege berechnet. Dafür wird zunächst in (67) für jedes benachbarte Knotenpaar die orthogonale Distanz als Differenz in einer der Raumkoordinaten bestimmt. Da die Transportwege als aneinandergereihte Wegsegmente gebildet werden, kann die tatsächliche Transportstrecke zwischen den Abteilun-

gen k und l als Summe aller an diesem Transport beteiligten Kanten bzw. Wegsegmente ermittelt werden ((68)). Erst unter Berücksichtigung dieser letzten beiden Restriktionen kann eine optimierte Layoutlösung entwickelt werden, indem Knoten und Kante so platziert bzw. aktiv genutzt werden, dass sie global optimal die Transportdistanz aller Fördervorgänge minimiert.

14. Literaturverzeichnis

- [Bro17] Broß, F.; Bräu, V.; Reinhart G.: Dimensionierung indirekter Bereiche in der Fabrikplanung. In: ZWF, Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 112. Jg. (2017), H. 6, S. 359-363.
- [Böh93] Böhme, G.: Fuzzy-Logik. Einführung in die algebraischen und logischen Grundlagen. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg 1993.
- [Gül97] Güllich H.-P.: Fuzzy-Experten-Systeme zur Beurteilung von Kreditrisiken. Deutscher Universitäts-Verlag GmbH, Wiesbaden 1997.
- [Kri12] Krieger, W.; Klaus, P.; Krupp, M.: Gabler Lexikon Logistik: Management logistischer Netzwerke und Flüsse. 5.
- [Kru15] Kruse, R. et al.: Computational Intelligence. Eine methodische Einführung in Künstliche Neuronale Netze, Evolutionäre Algorithmen, Fuzzy-Systemen und Bayes-Netze. 2. Aufl., Springer Fachmedien, Wiesbaden 2015.
- [Mar16] Martin, H.: Transport und Lagerlogistik: Systematik, Planung, Einsatz und Wirtschaftlichkeit, 10.Auflage, Springer Vieweg, Wiesbaden 2016
- [Pat19] Amit Patel. Red Blob Games: Amit's Thoughts on Pathfinding: Heuristics for grid maps. 2019. URL: <http://theory.stanford.edu/~amitp/GameProgramming/Heuristics.html> (besucht am 26. 09. 2020).
- [Paw14] Pawellek, G.: Ganzheitliche Fabrikplanung. Grundlagen, Vorgehensweise, EDV-Unterstützung, 2. Auflage, Springer Verlag, Berlin, 2014.
- [Pfe89] Pfeifer, H.: Grundlagen der Fördertechnik. 5. Auflage, Vieweg, Braunschweig, Wiesbaden 1989.
- [Tur09] Volker Turau. Algorithmische Graphentheorie. 3., überarb. Aufl. 2009. ISBN: 9783486590579. URL: <http://dx.doi.org/10.1524/9783486598520>.
- [Tra94] Traeger, D. H.: Einführung in die Fuzzy-Logik. 2. Aufl., Teubner, Stuttgart 1994.
- [Ull14] Ullrich, G.: Fahrerlose Transportsysteme: Eine Fibel – mit Praxisanwendungen – zur Technik – für die Planung. 2.Auflage, Springer Vieweg, Wiesbaden 2014
- [Utt18] Uttendorf, S.: Automated Generation of Roadmaps for Automated Guides Vehicle Systems. Dissertation Universität Hannover. In: Nyhuis. P. (Hrsg.): Wissenschaftliche Schriftenreihe des Instituts für Integrierte Produktion Hannover gGmbH. Tewiss – Verlag, Hannover 2018.
- [Wie14] Wiendahl, H.-P.; Nyhuis, P.; Reichardt, J.: Handbuch Fabrikplanung. Konzept, Gestaltung und Umsetzung wandlungsfähiger Produktionsstätten, 2., überarb. und erw. Auflage, Hanser Verlag, München, 2014.
- [Zim93] Zimmermann, H.-J.: Prinzipien der Fuzzy Logic. In: Spektrum der Wissenschaft, Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mb, Jg. (1993), H. 3, S. 90 ff.