

Planung von Intralogistiksystemen mit Hilfe von Antwortmengenprogrammierung

Warehouse planning with answer set programming

Steffen Schieweck^{1,2}
Gabriele Kern-Isberner¹
Michael ten Hompe²

¹Lehrstuhl Informatik 1 – Information Engineering
Fakultät für Informatik
Technische Universität Dortmund

²Lehrstuhl für Förder- und Lagerwesen
Fakultät Maschinenbau
Technische Universität Dortmund

Der Vorgang der Planung intralogistischer Systeme wird in der Regel unter Einsatz von hohem Ressourcen- und Zeitaufwand durchgeführt. Der resultierende Wunsch nach einer umfassenden Rechnerunterstützung ist daher bereits früh entstanden. Bis dato konnte sich keine umfassende Lösung in Industrie und Forschung durchsetzen. Der vorliegende Artikel stellt das Konzept eines Programms vor, welches die Vorzüge der Antwortmengenprogrammierung nutzt, um einen hochflexiblen und effizienten Planungsprozess zu unterstützen. Das Programm soll die Aufgabenbereiche der Prozessplanung, der Technikauswahl und -dimensionierung sowie der Layoutgenerierung unterstützen.

[Schlüsselwörter: Intralogistische Planung, Antwortmengenprogrammierung, Logische Programmierung, Materialflussplanung]

The process of warehouse planning is usually conducted employing an immense amount of resources. The desire for an extensive software-based support has been present for a long time. The presented article proposes the concept of a software tool which makes use of the strengths of answer set programming to facilitate warehouse planners in a highly flexible and effective manner. The tool aims to support the tasks of process planning, technology dimensioning and selection and layout generation.

[Keywords: Warehouse Planning, Answer Set Programming, Logical Programming]

1 EINLEITUNG

Die Planung von intralogistischen Systemen hat aufgrund hoher Investitionsvolumina und weitreichenden Auswirkungen auf Produktion und Betrieb einen hohen industriellen Stellenwert eingenommen. Die Komplexität der Problemstellung wird wesentlich durch die enorme Anzahl von Entscheidungen, die Vielfalt der prozessualen und technischen Ausprägungsformen bei jeder der Entscheidungen und die hohe Zahl von Interdependenzen zwischen den Entscheidungen geprägt. Dementsprechend wird der Vorgang der Planung in der Regel unter Einsatz von hohem Ressourcen- und Zeitaufwand durchgeführt. Sowohl die Geschwindigkeit der Planung als auch die Qualität des Ergebnisses zeigen starke Abhängigkeit von dem Erfahrungswissen des durchführenden Planungsteams [WS09]. Diese Abhängigkeit impliziert, dass getroffene Entscheidungen ohne entsprechende aufwendige Dokumentation selten vollständig nachvollziehbar sind. Der resultierende Wunsch nach einer Rechnerunterstützung des Planungsprozesses ist entsprechend früh aufgekommen. Die Rechnerunterstützung der Planung ist derzeit auf Insellösungen beschränkt, welche sich auf einzelne Subsysteme und einzelne Nutzer(gruppen) beziehen. Ansätze zur umfangreicheren Unterstützung der Planung bestehen in vielfältiger Form (siehe bspw. [Ell15, Job13, Wis09]), deren weitläufige Durchsetzung bisher jedoch noch nicht gelungen ist. Als besonders problematisch stellen sich der hohe Grad der Abstraktion, die geringe Flexibilität, der geringe Grad der Nutzerinteraktion und die schlechte Wartbarkeit durch aufwendige Programmierung heraus.

Antwortmengenprogrammierung (AWM) als Konzept der deklarativen Programmierung bietet hervorragende Eigenschaften zur Lösung komplexer Probleme, die eine enge Verknüpfung mit Expertenwissen erfordern [Geb13]. Sie ist eine Methode aus dem Gebiet der logischen

Programmierung, basierend auf stabilen Modellen nach der Definition von Gelfond und Lifschitz [GL88, GL91]. Die Stärken von AWM bieten einen hervorragenden Abgleich mit den Problemen der Lagerplanung. Beispielhaft können Verständlichkeit, Robustheit, Effizienz und Flexibilität hervorgehoben werden [AG11, DFP09, Geb13].

In dem vorliegenden Artikel soll das Konzept eines Softwaretools zur Planung intralogistischer Systeme mit Hilfe von AWM erläutert werden. Das Tool soll die Aufgabenbereiche der Prozessplanung, der Technikauswahl und -dimensionierung sowie der Layoutgenerierung unterstützen. Die kritische Komponente, der Planer, soll durch das Tool nicht ersetzt, sondern entlastet werden und für erhöhte Effizienz und Verfügbarkeit sorgen. Insbesondere soll der Prozess der Planung durch Nutzung einer modularen Struktur weiterhin so flexibel wie möglich gehalten werden und dem Nutzer vielfältige Eingriffsmöglichkeiten bieten. Weiterhin ermöglichen bestimmte Implementierungsformen die Berücksichtigung von Nutzerpräferenzen, bspw. bezüglich des Automatisierungsgrads der gewählten Technologien. Die Vielfalt der Art der Mikroentscheidungen der Metaaufgabe „Lagerplanung“ wird durch die Möglichkeit der hybriden (d.h. sowohl deklarativen als auch konventionellen) Programmierung abgedeckt. Die Bewältigung der dargestellten Komplexität durch kombinatorische Möglichkeiten wird durch hohe Effizienz der AWM-Solver unterstützt, die insbesondere für kombinatorische Probleme bekannt ist.

2 ANWORTMENGENPROGRAMMIERUNG

Die formalen Grundlagen der AWM wurden in den 1980er und 1990er-Jahren [GL88, GL91] gelegt. Insbesondere in der jüngeren Vergangenheit erfährt AWM, partiell induziert durch die Verfügbarkeit potenter Rechenmaschinen und effizienter Solver, hohe Aufmerksamkeit. Der Bereich des nichtmonotonen Schließens befasst sich mit dem Nachbilden von menschlichen Entscheidungen unter unsicherem Wissen und unvollständigen Informationen, AWM wird vielfach als rechentechnische Verkörperung von nichtmonotonem Schließen bezeichnet [AKL+05]. Wir führen in die grundlegenden Konzepte vom AWM ein und stellen die zugrundeliegende Semantik dar. Weiterführende, praxisnahe Abhandlungen sind beispielsweise in [DFP09, Geb13] enthalten.

Ein Antwortmengenprogramm besteht aus einer endlichen Zahl von Regeln r der Form

$$r: H \leftarrow A_1, \dots, A_n, \text{not } B_1, \dots, \text{not } B_m$$

worin H, A_j und B_j Literale sind und $0 \leq m, n$ gilt. Ein Literal kann die Ausprägungen A und $\neg A$ annehmen, wobei A ein Atom ist (bspw. eine logische Variable). H ist der Kopf und $A_1, \dots, A_n, \text{not } B_1, \dots, \text{not } B_m$ der Rumpf von r . Die Mengen $\text{pos}(r) = \{A_1, \dots, A_n\}$ und $\text{neg}(r) = \{B_1, \dots, B_m\}$ sind die

positiven und negativen Rumpfliterale von r . Die Interpretation einer solchen Regel ist wie folgt: Wenn alle Literale von $\text{pos}(r)$ gelten und kein Literal aus $\text{neg}(r)$ gilt, dann wird H gefolgert. Eine Regel ohne Rumpfliteral ist ein Fakt und besagt, dass H ohne jede Bedingung gilt [AKL+05].

Eine Besonderheit von AWM ist, dass die Funktion von not über die eines gewöhnlichen Negationsoperators hinausgeht. Es bewirkt, dass eine Regel mit $\text{not } A$ im Rumpf nur dann schließt, wenn A entweder nicht Teil der gültigen Antwortmenge ist oder aber das Literal ausdrücklich negiert ist ($\neg A$). Somit schließt die Regel, sofern kein Wissen über A besteht oder definitives Wissen darüber, dass A nicht gilt. Die Verwendung des klassischen Negationsoperators “ \neg ” ist nach wie vor möglich [DFP09].

Eine Menge von Literalen, die alle Regeln von P erfüllt, ist eine Antwortmenge des Programms P . Wird ein reales Problem über ein Antwortmengenprogramm abgebildet, ist eine gefundene Antwortmenge eine gültige Lösung des abgebildeten Problems. Wie bei einem realen Problem können für ein Programm keine, eine oder mehrere Antwortmengen (bzw. gültige Lösungen) existieren. Heutige AWM-Solver gestatten die Auswahl von Antwortmengen unter Beachtung von Zielfunktionen. Formal muss für die Suche nach einer gültigen Antwortmenge das Redukt P^S von P für den Zustand S definiert werden [GL88]:

$$P^S := \{H \leftarrow A_1, \dots, A_n \mid \\ H \leftarrow A_1, \dots, A_n, \text{not } B_1, \dots, \text{not } B_m \in P, \\ \{B_1, \dots, B_m\} \cap S = \emptyset\}.$$

Nach deren Begründern wird das definierte Redukt auch als Gelfond-Lifschitz-Redukt bezeichnet. Es wird mit den folgenden beiden Schritten gebildet [GL88]:

1. Alle Regeln, deren Rumpf ein $\text{not } B$ mit $B \in S$ enthalten, werden entfernt. Da B in S enthalten ist, kann keine dieser Regeln schließen.
2. In den verbleibenden Regeln werden alle Literale C aus $\text{neg}(r)$ (mit den zugehörigen not -Ausdrücken) entfernt. Da $C \notin S$ ist, haben sie keine weiteren Auswirkungen.

Das gebildete Redukt wird mit einem Bottom-Up-Ansatz in das vorliegende Programm eingesetzt und geprüft, ob es sich um eine gültige Antwortmenge handelt [DFP09]. Die Bildung des Reduktes wird für jeden Zustand S vorgenommen, von den angenommen wird, dass es sich um eine gültige Antwortmenge handeln könnte. Die Zusammenstellung dieser Kandidatenmenge von Zuständen ist ein wesentliches Unterscheidungsmerkmal zwischen verschiedenen AWM-Solvern. Sie hat einen signifikanten Einfluss auf die Länge des Lösungsvorgangs.

Zur Veranschaulichung des oben dargestellten Konstruktes wird folgendes AWM-Programm gegeben [SKH15]:

- $inBearbeitung(A) \leftarrow freigegeben(A),verfuegbar(A)$. (1)
 $verfuegbar(A) \leftarrow not\ reserviert(A),bezahlt(A)$. (2)
 $freigegeben(A) \leftarrow bezahlt(A)$. (3)
 $bezahlt(4712)$. (4)

In Zeile (4) wird definiert, dass Auftrag 4712 bezahlt ist. Ist ein Auftrag bezahlt, wird er zur weiteren Bearbeitung freigegeben (3). Sofern die Artikel des Auftrags nicht anderweitig reserviert sind, wird der Auftrag als verfügbar deklariert (2). Wenn der Auftrag durch die Bezahlung freigegeben wurde und die entsprechende Menge verfügbar ist, geht er in Bearbeitung (1).

Bis vor kurzem arbeiteten Programme zur Suche nach Antwortmengen grundsätzlich in zwei Stufen, dem Grundieren und dem Lösen. Im ersten Schritt, dem Grundieren, wird das nutzergenerierte Programm P durch ein äquivalentes Programm $grnd(P)$ ersetzt, in dem alle kombinatorischen Ausprägungen von Variablen instanziiert werden. Auf Basis von $grnd(P)$ werden im Lösungsprozess die gültigen Antwortmengen gesucht. Die strikte Trennung zwischen Grundieren und Lösen wird durch neuartige Formalismen und Algorithmen zeitweilig aufgehoben, um die Möglichkeit zu schaffen, in den Lösungsprozess eingreifen zu können und den Rechenaufwand in bspw. volatilen Umgebungen mit ähnlichen, wiederkehrenden Problemstellungen zu verringern. Zusätzlich wurde die Möglichkeit geschaffen, klassische, imperative Programmierung innerhalb von Antwortmengenprogrammen zu nutzen und so hybride Programme zu schaffen. [GKK+14].

3 PLANUNG VON INTRALOGISTIKSYSTEMEN

Die Forschungsarbeiten im Bereich der Planung von Intralogistiksystemen sind vielfältig und Gegenstand einer Vielzahl, stellenweise mehrteiliger und dennoch nur begrenzt vollständiger Publikationen (siehe bspw. [GGM07, GGM10, AG85, MBH15]). Da die vorliegende Forschungsarbeit die Thematik umfassend behandelt, ist ebenso eine Vielzahl von Forschungsarbeiten relevant. Diese sind im Folgenden nach der Art der entwickelten Methode gegliedert. Es sei darauf hingewiesen, dass lediglich eine Auswahl beispielhafter Publikationen zu den jeweiligen Themengebieten genannt werden kann.

3.1 VORGEHENSMODELLE

Der Prozess der Planung von intralogistischen Systemen folgt einem inhärenten Ablauf. Dieser wird von einigen Autoren aufgegriffen, formalisiert und der Versuch unternommen, eine Effizienzsteigerung zu erzielen. Jünemann entwickelt die 7-Stufen-Planungssystematik [Jün89], diese wird von ten Hompel überarbeitet [HSN07].

Ein Vorgehensmodell mit ähnlicher Zielstellung definiert Gudehus [Gud12], in welchem vier Schritte aufgeführt werden und kein unmittelbarer Bezug zu logistischen Systemen erkennbar ist. Eine ähnliche Gliederung des Planungsprozesses wird nach VDI2498 vorgenommen [VDI2498]. Aus dem englischsprachigen Raum vereinen Baker und Canessa verschiedene publizierte Stufenmodelle mit den Erfahrungen von Materialflussplanern aus der Industrie [BC09]. Die genannten Vorgehensmodelle weisen eine starke Ähnlichkeit zueinander auf. Sie geben eine grobe Struktur vor, zu deren Durchführung lediglich Experten in der Lage sind. Der Grad der Detaillierung ist vergleichsweise gering, weshalb die Modelle der strategischen Ebene zuzuordnen sind. Teilentscheidungen der Prozesse lassen sich durch quantifizierte Modelle abbilden. In der jüngeren Vergangenheit wird vermehrt Fokus darauf gelegt, nicht-quantifizierbare Entscheidungen zu formalisieren, beispielsweise mit dem Model-Based Systems Engineering Ansatz [MSS14].

3.2 SYSTEMATISIERUNG

Die Ausprägungen der Subsysteme von intralogistischen Systemen sind vielfältig und werden stetig weiterentwickelt. Die rechentechnische Verarbeitung zur Planung erfordert jedoch eine Strukturierung vorhandenen Wissens. Aus diesem Grund (unter anderen) wurden eine Reihe von Systematisierungen der relevanten Ausprägungen entwickelt. Der Kommissionierung als Kernfunktion von Warenhäusern wird hierbei die größte Aufmerksamkeit gewidmet. Venn und Geißel klassifizieren diese in acht verschiedenen Bausteinen, die auf einer schriftlichen Umfrage und Interviews basieren [VG11]. Dallari et al. gehen, im italienischen Raum, ähnlich vor und leiten fünf Arten von Kommissioniersystemen ab [DMM09]. Gudehus nimmt eine Klassifizierung danach vor, wie sich die für den Pick-and-Place Vorgang benötigten Elemente an einem gemeinsamen Ort einfinden, insgesamt ergeben sich sechs Kommissionierverfahren [Gud10]. Die Klassifizierung nach ten Hompel et al. basiert primär auf der Zuordnung „Person-zur-Ware“, „Ware-zur-Person“ oder „kombiniert“ und sekundär auf dem Grad der Automatisierung [HSB11]. Die Anzahl der Ausprägungen ist hoch (13), jedoch wird ein herausragender Überblick über die technischen Realisierungsformen gegeben, die einen enormen Stellenwert für die Dimensionierung aufweisen.

3.3 LEISTUNGS- UND DIMENSIONIERUNGSVORSCHRIFTEN

Zur Auslegung verschiedener technischer Gewerke steht eine Vielzahl heuristischer Berechnungsverfahren zur Verfügung. Bedeutsame Quellen für anerkannte Berechnungsverfahren sind Normen, wie bspw. vom Verein Deutscher Ingenieure (VDI) oder der Fédération Européenne de la Manutention (FEM). Darunter befinden sich bspw. Vorschriften zur Spielzeitberechnung von Regalbediengeräten

[FEM9.851] oder auch automatischen, mehrfach tiefen Lagersystemen [VDI3561]. Ansätze zur Wegzeitberechnung in manuellen Person-zur-Ware Systemen werden u.a. von Sadowsky [Sad07] und Hwang [HOL04] publiziert. Weitreichende Modelle zur Planung von Kommissioniersystemen sind in [Gud92] und [GKS92] enthalten. Nicht zu vernachlässigende Einschränkungen resultieren aus Vorschriften zum Brandschutz und Berücksichtigung von Fluchtwegen [Aus07].

3.4 COMPUTERUNTERSTÜTZUNG

Die Computerunterstützung der Planung intralogistischer Systeme ist aufgrund des Zeitaufwands der Planung und den damit verbundenen Kosten ein seit einigen Jahren verfolgtes Ziel. Lineare oder nichtlineare Optimierungsmodelle sind grundsätzlich dazu in der Lage, auf Basis von Zielfunktion, Nebenbedingungen und Eingabeparametern eine optimale Lösung der modellierten Problemstellung zu finden. Ein Überblick über die Arbeiten im englischsprachigen Raum wird in [GGM10] gegeben. Hier wird resümiert, dass eine große Lücke zwischen den entwickelten Modellen und den Anforderungen der Industrie klafft. Häufig handelt es sich um abgeschlossene, spezifische Problemstellungen mit einer Vielzahl von Annahmen. In [AG11] wird ein vollständiges Programm zur Planung von automatischen Lagersystemen entwickelt. Dieser Ansatz wird in [GS16] auch auf manuelle Lagersysteme angewandt.

Der Begriff „Expertensystem“ wurde vorrangig in den 1980er und 90er Jahren geprägt. Sie sollen die Stärken der menschlichen Erfahrung mit denen einer rechen-technischen Unterstützung vereinen. Vorrangig wurden diese zur Auswahl von Förder- [FUG04] und Lagersystemen entwickelt [Fan95]. Sommer entwickelt ein regelbasiertes Verfahren zur Grobplanung von Systemen zur Paletten- und Paketdistribution [Som10]. Weitere Methoden zur Computerunterstützung existieren im Bereich der Agentenprogrammierung [Ell15], Graphentheorie [Job13], Fuzzy-Logik [Kul05], Simulation [Ven11] und auch Bedientheorie [MM07].

3.5 FAZIT ZUM STAND DER FORSCHUNG

Eine Vielzahl von Methoden und Modellen wurden bis heute entwickelt, um den Planungsexperten im Prozess zu unterstützen und breiter verfügbar zu machen. Der Transfer in die betriebliche Praxis ist nur wenigen der oben genannten Methoden gelungen. Am ehesten finden sich hier die in Normen festgehaltenen Vorschriften zur Leistungsberechnung und Dimensionierung wieder. Allzu häufig wird jedoch auf Auswahlkriterien wie Erfahrung, Internetrecherche oder persönliche Kriterien zurückgegriffen [WS14]. Ein Ansatz, der die Antwortmengenprogrammierung verwendet, ist bis dato nicht bekannt. Aus den folgenden Gründen ist er dennoch vielversprechend:

- *Vielfalt*: Große Teile der Aufgabenstellungen können abgedeckt werden. Hybride Programmierung erweitert das Spektrum zusätzlich.
- *Vollständige Deklarativität*: Unterstützt eine modulbasierte Entwicklung sowie gute Wartbarkeit und Verständlichkeit.
- *Default-Negation*: Ausnahmeregelungen können einfach und verständlich berücksichtigt werden.
- *Verständlichkeit*: Die Regeln sind in natürlicher Sprache verfasst und folgen einem einfachen Schema (Wenn, Dann).
- *Effizienz*: Die Zahl der Ausprägungsformen ist beträchtlich und wirft hohe kombinatorische Komplexität auf. AWM-Solver sind für derartige Probleme hocheffizient.
- *Robustheit*: AWM-Programme sind robust gegenüber Nutzereingriffen und –vorgaben. Es muss kein Prozess angepasst werden, sondern Vorgaben werden akzeptiert und als gegeben übernommen.

4 SYSTEMDESIGN

Das präsentierte Konzept greift vorhandene Forschungen auf, entwickelt neue Ansätze und versucht, diese möglichst gewinnbringend in einem AWM-Programm umzusetzen. Das Konzept ist in großen Teilbereichen bereits implementiert. In seiner Grundform ist das Programm dank der vollständigen Deklarativität von AWM so flexibel und robust, dass es jederzeit erweitert werden kann.

4.1 STRUKTUR UND PLANUNGSVORGEHEN

Im folgenden Abschnitt werden sowohl die übergeordnete Struktur des Programms, wie auch das implementierte Planungsvorgehen beschrieben. Zuletzt wird die implementierte Datenstruktur erläutert.

4.1.1 METASTRUKTUR

Der Prozess zur Planung intralogistischer Systeme ist in der Regel langwierig und komplex. Die 7-Stufen-Planungssystematik gliedert diesen wie folgt [HSN07]:

1. Aufgabenstellung
2. Planungsdatenanalyse
3. Entwurf von Prozessvarianten
4. Entwurf von Arbeitsmittelvarianten
5. Dimensionierung, Überprüfung und Bewertung der Varianten
6. Feinplanung
7. Realisierung

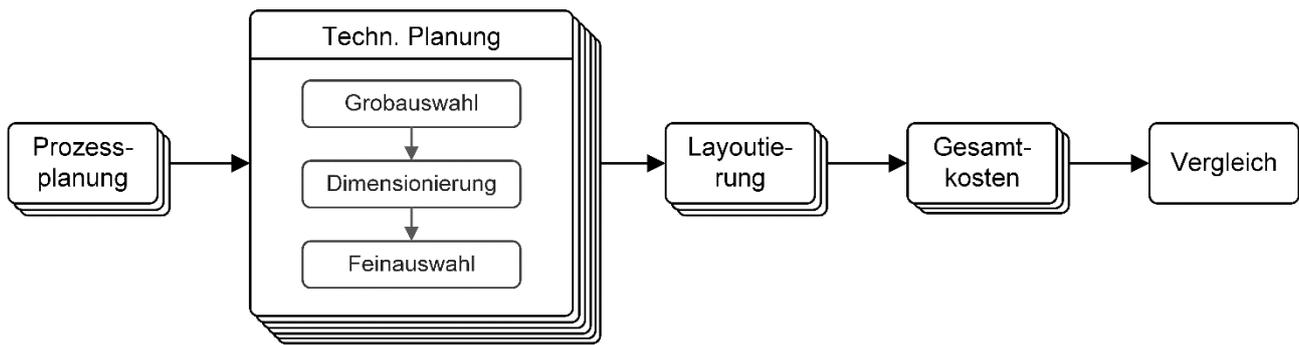


Abbildung 1. Metastruktur und Planungsvorgehen

Die vorliegende Methodik soll die Schritte 3-5 unterstützen. Es wird davon ausgegangen, dass die Analyse der Planungsdatenbasis bereits erfolgt ist. Die mit der Methodik generierten und bewerteten Varianten können in die Stufe der Feinplanung übergeben werden.

Der Lösungsraum der vorliegenden Problemstellung wird durch eine Vielzahl von Parametern aufgespannt. Dazu zählen die verschiedenen Prozessvarianten, die große Anzahl verschiedener technischer Ausprägungen von Arbeitsmittelvarianten, die Layoutgenerierung innerhalb und zwischen Funktionsbereichen und die Kostenbewertung auf Basis vielfältiger Parameter. Zur Bewältigung der Komplexität wird das Planungsvorgehen entsprechend Abbildung 1 horizontal strukturiert. Das Programm muss somit nicht mehr *alle* möglichen Ausprägungen des Systems betrachten, sondern wird von Schritt zu Schritt geleitet. Auf diesem Weg hat der Nutzer die Möglichkeit, in den Prozess einzugreifen, Zwischenergebnisse zu plausibilisieren und unerwünschte Ansätze frühzeitig auszuschließen. Die horizontale Strukturierung bietet außerdem den Vorteil, die modulare Nutzbarkeit des Programms zu verstärken. So kann beispielsweise ein anderweitig dimensioniertes System, dessen Anordnung der Funktionsbereiche noch nicht abgeschlossen ist, das Modul „Layoutierung“ zu genau diesem Zweck nutzen, ohne die Schritte „Prozessplanung“ und „Technische Planung“ mit den entsprechenden Eingabeparametern durchlaufen zu müssen.

Eine Anforderung an die durchgeführte Datenanalyse ist, dass Gruppen von Artikeln (Cluster) definiert werden, die eine gleiche Behandlung im Materialfluss erfahren sollen. Verschiedene Cluster können durchaus auf dieselbe Art und Weise behandelt werden, ein Cluster wird aber in diesem und den nachfolgenden Schritten nicht weiter unterteilt. Beispielhaft kann hier eine Clusterung nach dem Attribut Gängigkeit (Schnell-, Mittel- und Langsamdreher) oder dem Ladungsträger vorgenommen werden. Sollen alle Artikel auf die gleiche Art und Weise behandelt werden, wird lediglich ein Cluster generiert. Frühere Autoren (siehe bspw. [Job13, McG12]) betonen, dass es sich bei der Klassifizierung bereits um eine wichtige Designentscheidung handelt. Die Computerunterstützung bietet hier weitrei-

chende Vorteile, insbesondere in Bezug auf die Verringerung der Planungsdauer und der daraus resultierenden steigenden Größe des prüfbaren Suchraums.

Die Prozessplanung findet auf Basis vordefinierter Flusstypen statt, die bei der Verarbeitung von Artikel- zu Auftragsströmen auftreten. Aus der Prozessplanung resultiert eine Anzahl von betrachteten Flusstypen, die sich aus einer Abfolge von Basisfunktionen zusammensetzen. Jedem Cluster werden ein oder mehrere Flusstypen zugewiesen. Die technische Planung wird für jede Basisfunktion jeden Flusstyps jedes Clusters vorgenommen. Nach einer Grobauswahl der technischen Ausprägungen auf Basis von Expertenwissen wird die Dimensionierung der gewählten technischen Ausprägungen vorgenommen. Diese können anschließend kostenmäßig bewertet werden und aufgrund dessen weiter eingegrenzt werden (Feinauswahl). Die präferierten technischen Ausprägungen der Funktionsbereiche werden über die Zuordnung ihrer Cluster und Flusstypen zu Varianten zusammengefügt. Für diese Varianten kann auf Basis der Abmessung der Funktionsbereiche und ihrer Transportbeziehungen ein Gesamtlayout (eine Anordnung der Funktionsbereiche innerhalb räumlicher Grenzen) generiert werden. Mit den Informationen, wie viel Fläche und Raum eine Variante beansprucht, können die Gesamtkosten der Variante ermittelt werden. Auf dieser Basis kann ein abschließender Vergleich der Varianten stattfinden.

Während des Planungsprozesses findet eine laufende Bewertung der Systeme und Subsysteme statt. Zwar werden einige der theoretisch möglichen Ausprägungen seitens des Programms ausgeschlossen. Die letztliche Entscheidung, welche der Vorzugsvarianten ausgewählt werden soll, obliegt jedoch dem Nutzer. Wie im Ablauf einer solchen Planung üblich, kann der Nutzer nach der Generierung und Bewertung der Varianten weitere Anpassungen vornehmen. Sämtliche, in der Planung genutzte Daten, können vom Nutzer eingesehen werden, so dass die Plausibilität der Lösungen überprüft werden kann.

4.1.2 DATENSTRUKTUR

Bei der implementierten Datenstruktur wird zunächst zwischen Nutzerdaten und Basisdaten unterschieden. Nutzerdaten müssen in jeder Planung spezifiziert werden und

dienen der Beschreibung des vorliegenden Planungsproblems. Dazu zählen beispielsweise die Größe des Artikelstamms, die Gängigkeit der Artikel oder die Ankunftsfrequenz von Anlieferungen zu Spitzenzeiten. Basisdaten sind im Programm enthalten und werden generell als gegeben betrachtet. Der Nutzer hat jedoch die Möglichkeit, auch diese anzupassen. Beispielhaft genannt seien an dieser Stelle die Geschwindigkeit von Regalbediengeräten, die Zeit für die Entnahme einer Position oder die Steigerungsrate der Lohnkosten eines jeden Jahres.

Für die in Kapitel 4.1.1 eingeführten Cluster werden die Nutzerdaten aggregiert abgefragt. Es kann erforderlich sein, für die definierten Flusstypen spezifische Daten für die Cluster abzufragen (bspw. Größe des Artikelstamms im Nachschub- und Kommissionierlager). Die in der Planung verwendeten Atome enthalten die abgefragten und aus diesen abgeleiteten Daten. In Abhängigkeit ihres Aggregationslevels werden sie über das 2-Tupel (C, Ft) oder das 4-Tupel (C, Ft, N, T) mit den Relationen Cluster C , Flusstyp Ft , Stufe im Materialfluss N und Technologie T eindeutig gekennzeichnet.

Der Nutzer hat weiterhin die Möglichkeit, auf vielfältige Art und Weise einzugreifen. Zunächst ist es möglich, zu spezifizieren, ob der Wunsch nach einer automatisierten Lösung in den Funktionsbereichen besteht oder ein manuelles System präferiert wird. Das Programm reagiert dann, nach Möglichkeit, auf die Nutzerpräferenzen. Als weitere Möglichkeit können die vom Programm generierten Lösungen vollständig oder teilweise angepasst werden. Wünscht der Nutzer beispielsweise, dass eine bestimmte Technologie für ein Cluster verwendet wird, so spezifiziert er diesen Wunsch als Fakt. Das Programm behandelt diesen als gegeben und arbeitet mit den verbleibenden Freiheitsgraden.

4.2 PROZESSPLANUNG

Eine Reihe von Autoren haben sich mit dem (Teil)Problem befasst, eine Prozessplanung für intralogistische Systeme vorzunehmen (siehe bspw. [HSN07, Wis09, Som10, McG12, Job13]). Die genannten Ansätze lassen vermuten, dass es nicht praktikabel ist, eine Prozessbeschreibung ohne jeden Bezug auf die spätere Realisierung vorzunehmen. Eine allgemeine, unabhängige Beschreibung des Prozessablaufs würde eine Generierung von Prozessalternativen ad absurdum führen. Wir möchten zwar Hinweise auf die Funktionsweise des späteren Distributionszentrums geben und damit auch in gewissermaßen technische Varianten einschränken. Auf der anderen Seite soll die Einschränkung nicht zu weitreichend sein.

4.2.1 GRUNDFUNKTIONEN

Die in Kapitel 4.2 genannten Ansätze der Beschreibung von Prozessvarianten in Distributionszentren stimmen insofern überein, als dass sie aus Bausteinen von Funktionen, Prozessen oder Funktionsbereichen bestehen. Dieses Vorgehen bringt die Vorteile mit sich, dass der Entscheidungsraum beschränkt und durch Standardisierung eine automatische Verarbeitung für die Generierung der Varianten und deren Weiterverarbeitung ermöglicht wird. Die einzelnen Bausteine müssen ausreichend definiert sein. Die Definition muss derart erfolgen, dass alle relevanten Tätigkeiten eines Distributionszentrums abgedeckt und die Varianten unterscheidbar sowie eindeutig zuzuordnen sind. Die Grundfunktionen dieses Ansatzes werden folgend definiert:

Receive	Transformation des Eingangsstroms von Gütern in einen oder mehrere interne Ströme.
Put	Einlagerungsprozess von Gütern, ggf. auf einem Ladungsträger gebündelt mit gleich- oder verschiedenartigen Artikeln.
Store	Geplantes Liegen von Gütern in einem ausgewiesenen Lagerbereich (i. A. an [VDI2411]).
Pick	Entnahme der Güter aus einem Lagerbereich. Möglicherweise verbunden mit zusätzlichen Tätigkeiten wie Wiegen, Messen, Etikettieren.
Sort	Verteilen von in ungeordneter Reihenfolge ankommenden Gütern aufgrund vorgegebener Merkmale (bspw. Aufträge) auf Ziele (Endstellen, Sammeleinrichtungen). Dedizierter, klar von Pick getrennter Prozess ¹ (i.A. an [VDI3619]).
Ship	Transformation des internen Stroms von Aufträgen zu externem Strom.
Move	Räumliche Bewegung von Gütern, Fahrzeugen und/oder Personen.

Dabei ist zu beachten, dass die Grundfunktion *Move* zwar in einer Reihe mit den weiteren Funktionen definiert wird, sie als übergreifende Funktion jedoch nicht in der Definition von Flusstypen in Kapitel 4.2.2 enthalten ist.

¹ Sortieren während der Kommissionierung (*Pick*) ist somit nicht als gesonderte Grundfunktion zu verstehen.

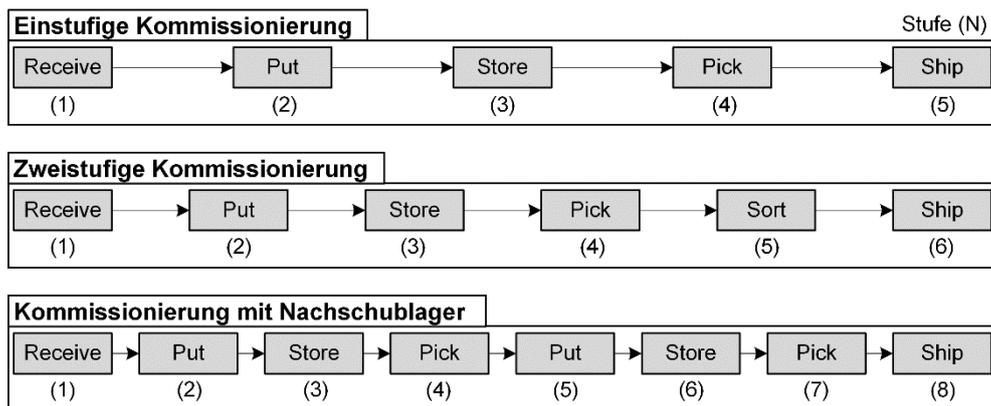


Abbildung 2. Definition der Flusstypen

4.2.2 FLUSSTYPEN

Um den Suchraum des Planungsproblems auf ein handhabbares Maß einzugrenzen, muss die Vernetzung der in Kapitel 2.2 definierten Grundfunktionen zu einer Prozessvariante bestimmten Regeln folgen. Dies erfolgt durch einen Bezug auf vorherrschende Gesetzmäßigkeiten und übliche Strukturen (Expertenwissen). Entsprechend wird in Abbildung 2 eine Anzahl von Flusstypen definiert, die ein Cluster durchlaufen kann. Die Definition erfolgt auf Basis der in Kapitel 4.2.1 definierten Grundfunktionen. Eine in einem Flusstyp befindliche Grundfunktion impliziert deren technische Implementierung. Auf welche Art und Weise die Umsetzung erfolgt, bleibt an dieser Stelle noch offen.

4.2.3 VORGEHEN

Entsprechend der Zielsetzung und Annahmen aus Kapitel 2.1 wird folgend der Ablauf zur Planung der Prozessvarianten dargestellt. Wie eingangs beschrieben ist ein notwendiges Ergebnis aus der vorangegangenen Datenanalyse eine oder mehrere Varianten verschiedener Artikelcluster. Wir definieren in Kapitel 4.2.2 eine Anzahl von grundlegenden Flusstypen, die mögliche Materialflüsse für Artikelcluster darstellen. Ein Nutzer kann einen dieser Flusstypen für einen Cluster vorgeben oder auch keine Vorgabe treffen. Im letzteren Fall werden nach aktuellem Stand alle definierten Flusstypen als möglich betrachtet. Es ist angedacht, im weiteren Verlauf durch Einbringung von Expertenwissen oder weiterer Ergebnisse der Datenanalyse die Auswahl einzuschränken.

Je nachdem, ob Flusstypen durch den Nutzer vorgegeben sind oder nicht, wird für jedes Cluster die entsprechende Anzahl von Materialflüssen über die notwendigen Funktionen (siehe Kapitel 4.2.1) erstellt. Das Resultat aus diesem Schritt sind voneinander isolierte Materialflüsse, die den Ablauf für jeweils ein einzelnes Cluster beschreiben. Für jede zu berücksichtigende Funktion wird ein Atom $cluster_flow_stage_function(C, Ft, N, F)$ definiert.

Der vorgestellte Ansatz greift einige Ideen der eingangs von Kapitel 4.2 genannten Forschungsergebnisse

auf. Insbesondere finden die Ideen von McGinnis [McG12] einer funktionsbasierten Beschreibung von Materialflusssystemen und die flussbezogene Betrachtung einzelner Cluster nach Jobi [Job13] Beachtung. Im Gegensatz zu McGinnis wird der Anteil von Expertenwissen, der im Design Workflow integriert ist, durch die Definition der Flusstypen noch weiter erhöht. Zudem ist eine größere Vielfalt von technischen Implementierungen möglich (bspw. Kommissionierung mit Nachschublager). Der Nutzer kann mit dem Programm interagieren und Konzepte für die Behandlung bestimmter Cluster erzwingen. Dadurch wird sichergestellt, dass ihm weiterhin die Kontrolle über die generierten Prozessvarianten obliegt.

4.3 TECHNISCHE PLANUNG

Die technische Planung ist in die Teilschritte Grobauswahl, Dimensionierung und Feinauswahl unterteilt, die gegenseitige Abhängigkeit zeigen. Auf einer übergeordneten Ebene wird weiterhin danach gestrebt, eine zu große Vielfalt von Technologien im geplanten System zu vermeiden. Zu einem Teil wird dies bei der Feinauswahl sicher gestellt und ist in Kapitel 4.3.3 näher erläutert. Zusätzlich ist festgelegt, dass sich die verwendeten Technologien im Warenein- und -ausgang nach Möglichkeit nicht unterscheiden, sowohl innerhalb eines Clusters als auch bei Betrachtung der unterschiedlichen Cluster.

4.3.1 GROBAUSWAHL

Ein erfahrener intralogistischer Planer ist dazu in der Lage, auf Basis der vorliegenden Informationen eine Vorauswahl von infrage kommenden Lager- und Kommissioniertechnologien zu treffen. Somit wird die Anzahl der zu überprüfenden Technologien und der damit einhergehende Aufwand im weiteren Planungsvorgehen erheblich reduziert.

Dieses Vorbild wird für das vorliegende Programm angewandt. Auf Basis von Kriterien und bekanntem Expertenwissen wird eine Vorauswahl getroffen. Für die Funktionen *Receive* und *Ship* werden die Kriterien Rampenform,

Ladehilfsmittel, Verladungsprinzip und Verladungsart definiert (siehe [HSN07]). Diejenigen Technologien, welche allen gewählten Kriterien entsprechend, werden in dem Atom *auswahl(C,Ft,N,receive,T)* gespeichert.

Die Funktionen *Put*, *Store* und *Pick* werden für die folgenden Schritte zwar gesondert dimensioniert, unterliegen aufgrund ihrer engen Verknüpfung untereinander aber auch einer Gesamtbetrachtung. So findet die Grobauswahl für diese Funktionen gesammelt auf Basis der in Abbildung 3 dargestellten Regeln statt. Als weiteres Kriterium werden die möglichen Flusstypen herangezogen, die einem Cluster zugeordnet sind. Es ist beispielsweise nicht vorgesehen, bei einer klassischen, einstufigen Kommissionierung ein Pick-to-belt System zu dimensionieren.

4.3.2 DIMENSIONIERUNG

Das Vorgehen bei der Dimensionierung zeigt starke Abhängigkeit von der jeweiligen Technologie, für die ein Atom *auswahl(C,Ft,N,F,T)* besteht. Bei der Dimensionierung werden sowohl statische wie auch dynamische Charakteristika der Systeme ausgelegt. Beispielsweise werden für einen Funktionsbereich die benötigte Kubatur (Breite, Länge und Höhe, Anzahl der Regale) und auch die Anzahl der benötigten Betriebsmittel bestimmt. Ein Funktionsbereich ist dadurch definiert, dass er räumlich abgetrennt im Blocklayout zu erkennen ist. Die Funktionen *Receive* und *Ship* stellen beispielsweise einen Funktionsbereich dar, die Funktionen *Put*, *Store* und *Pick* werden einem einzelnen Funktionsbereich zugeordnet. Die Auslegung geschieht auf Basis von Soll-Werten, die in den Nutzerdaten vorgegeben wird.

Den Kernfunktionen eines intralogistischen Systems *Put*, *Store* und *Pick* wird besondere Aufmerksamkeit gewidmet. Durch die Funktion *Store* werden zunächst die statischen Abmessungen der Lagertechnologie bestimmt. Diese haben signifikanten Einfluss auf die anschließende Auslegung der dynamischen Leistung des Systems, die durch *Put* und *Pick* bewältigt werden muss. Die Funktionen *Put* und *Pick* werden generell getrennt betrachtet, weil ihre

Erfüllung verschiedener Charakteristika (bspw. durch unterschiedliche Fördermittel) unterliegen kann. Einen Sonderfall stellen automatische Lagersysteme dar, die von Regalbediengeräten bedient werden. Aufgrund der hohen Kosten von Regalbediengeräten wird ein besonderer Fokus auf die Verringerung der Gassenanzahl gelegt. Aus diesem Grund wird das oben dargestellte Vorgehen zu einem gewissen Grad aufgebrochen, indem die statische und dynamische Auslegung wechselwirkend vorgenommen werden.

Die Auslegung der jeweiligen Gewerke wird, falls vorhanden, auf Basis etablierter Berechnungsvorschriften vorgenommen (siehe Kapitel 3.3). Es ist möglich, durch Vorgabe bestimmter Fakten auch auf diese, sonst als Inselösungen implementierten, Berechnungen zuzugreifen.

4.3.3 FEINAUSWAHL

Die Feinauswahl dient zunächst der weiteren Eingrenzung der zur Verfügung stehenden Varianten. Es ist ebenfalls möglich, dass der vorhergehende Schritt der Dimensionierung eine Nichterfüllbarkeit von Voraussetzungen (z.B. Lagerkapazität innerhalb einer bestimmten Kubatur) für eine bestimmte Variante ergeben hat. In diesem Fall wird die jeweilige Variante nicht weiter betrachtet.

Als Bewertungskriterium werden die in einem bestimmten Betrachtungszeitraum entstehenden Kosten berechnet. Berücksichtigung finden die Kostenarten und -faktoren

- Investkosten,
- Personalkosten,
- Lohnkostensteigerungssatz,
- Instandhaltungskosten,
- Energiekosten und
- Abschreibungskosten.

Gängigkeit der Artikel	Artikeldimensionen			
	Sehr klein (Stk., Beh.)	Klein bis mittel (Behälter)		Groß (Palette)
Langsamdreher	Liftsystem	Liftsystem	Regalfront an AKL	Kommissionieren im Hochregal
		Ware-zur-Person Kommissionierstation (AKL)	Konventionelles Kommissionieren aus Fachbodenregalen	Ware-zur-Person Kommissionierstation (HRL)
Mitteldreher	Durchlaufregal	Zweistufige Kommissionierung mit Pick-to-belt	Regalfront an AKL	Konventionelles Kommissionieren Bodenzeilenlagerung
Schnelldreher		Kommissioniernest	Schacht-kommissionierer	Durchlaufregal

Abbildung 3. Expertenwissen zur Grobauswahl von Kommissioniersystemen (i.A. [HSB11])

Die Kosten werden für einen festgelegten Zeitraum für jede mögliche technische Ausprägung jeden Clusters für jeden der vorgegebenen Flusstypen berechnet, bei dem eine Dimensionierung abgeschlossen wurde. Durch die Gesamtbetrachtung der Funktionen *Put*, *Store* und *Pick* als Funktionsbereich werden hierfür Gesamtkosten ermittelt.

Die bewerteten Alternativen unterliegen zunächst einer isolierten Betrachtung der einzelnen Funktionsbereiche. Um die Möglichkeit zu erhalten, passende Lagerbereiche verschiedener Cluster untereinander zu kombinieren und somit ein hochwertiges globales Optimum zu erzielen, werden die bei isolierter Betrachtung unterlegenen Technologien nicht direkt verworfen. Nach aktuellem Stand wird geprüft, ob dieselbe Lager- und Kommissioniertechnologie mehrfach in unterschiedlichen Clustern auftritt. Ist das der Fall, wird das Cluster virtuell zusammengefasst und eine erneute Kostenermittlung vorgenommen. Die abschließende Bewertung und Auswahl von Technologien erfolgt somit auf Basis der Gesamtkosten, die durch die Verwendung der kostenminimalen Technologien und Flusstypen eines Clusters entstehen.

4.4 LAYOUTGENERIERUNG

Eine Anzahl von durch den Nutzer ausgewählten Vorzugsalternativen wird einer detaillierteren Betrachtung unterzogen. Für eine abschließende Ermittlung der Gesamtkosten muss die Fläche ermittelt werden, die für das Logistiksystem benötigt wird. Somit muss ein Gesamtlayout des Systems, das heißt, eine möglichst optimale Anordnung der Funktionsbereiche, generiert werden. Dieser Schritt ist außerdem Inhalt der weiteren Planung.

Zu diesem Zweck hat der Nutzer die Möglichkeit, Begrenzungen für die Bebauungsfläche anzugeben, innerhalb derer sich die Funktionsbereiche anordnen lassen. Zur Generierung des Layouts werden die Funktionsbereiche derart angeordnet, dass die umspannte Fläche des Gesamtkonstruktes minimiert wird. Als weiteres Kriterium werden die mit den Transportfrequenzen gewichteten Distanzen zwischen den Funktionsbereichen minimiert. Weiterhin kann der Nutzer spezifizieren, dass Warenein- und -ausgang nebeneinander angeordnet werden sollen. Standardmäßig werden die Warenein- und -ausgänge der unterschiedlichen Cluster zudem mit ihren Docks am Rand des Gesamtlayouts angeordnet. Das Programm ist dazu in der Lage, unterschiedliche Orientierungen der übergebenen Flächen zu berücksichtigen. Weiterhin kann der Nutzer zusätzliche Flächen (wie etwa Produktions- und Konfektionsflächen) angeben, die in die Layoutplanung mit einbezogen werden sollen.

5 FALLBEISPIEL

Zur Illustration ausgewählter Funktionalitäten des Programms wird ein abgegrenztes Fallbeispiel dargestellt. Der Nutzer plant mit den beiden Clustern „pallet“ und „box“. Eine Übersicht der Nutzerparameter ist in Tabelle 1 gegeben. Der Nutzer spezifiziert, dass beide Cluster in einem klassischen, einstufigen System kommissioniert werden sollen. Der Betrachtungszeitraum für die Kostenrechnung beträgt 5 Jahre. Der Nutzer gibt den Wunsch vor, möglichst keine automatisierten Lösungen im Warenein- und -ausgang zu planen.

Bei den Funktionen *Receive* und *Ship* werden als kostengünstigste Alternativen für das Cluster „box“ Teleskopförderer mit manueller Entladung bei zwei Docks ermittelt. Für das Cluster „pallet“ werden Gabelstapler mit mehrfachtiefer Gabel, ebenfalls mit zwei Docks ausgewählt. Der Funktionsbereich für die Funktionen *Put*, *Store* und *Pick* wird für das Cluster „box“ mit Fachbodenregalen und manueller Kommissionierung und das Cluster „pallet“ mit Bodenzeilenlagerung und Einsatz von klassischen Gabelstaplern (*Put*) und Horizontal-Kommissionierfahrzeugen (*Pick*) realisiert. Da unterschiedliche Lagertechnologien verwendet werden, wird eine Vereinigung der Cluster nicht vorgenommen. Auch die Alternativen mit den nächstbesseren Kosten (Automatisches Kleinteilelager und automatisches Hochregallager) ermöglichen keine Vereinigung der Cluster.

Tabelle 1. Nutzerparameter des Fallbeispiels

	box	pallet
Ladungsträger	Paletten	Behälter
Wareneingang	3 LKW/h	5 LKW/h
Warenausgang	5 LKW/h	5 LKW/h
Kapazität	3000 Stellpl.	800 Stellpl.
Aufträge/h	100	200
Positionen/Auftrag	5	4
Eingang (LT/h)	10	10

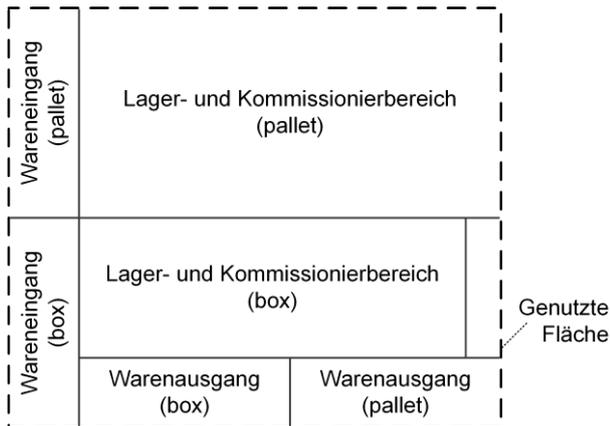


Abbildung 4. Generiertes Layout

Die Vorzugsalternativen werden übernommen und dem Schritt „Layoutierung“ unterzogen. Das in Abbildung 4 dargestellte Layout wird generiert und resultiert in einer genutzten Fläche von 4.200 m². Somit ergeben sich Gesamtkosten der Vorzugsvariante von 12,9 Mio. €, die sich aus den Investitionskosten und laufenden Kosten/a für den gesamten Betrachtungszeitraum zusammensetzen.

6 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Der vorliegende Artikel stellt ein Konzept eines Programms vor, das den Prozess der Planung intralogistischer Systeme hochflexibel und effizient unterstützen soll. Das Programm unterstützt die Aufgaben der Prozessplanung, Technikauswahl und -dimensionierung und der Layoutgenerierung. Entsprechend der genannten Reihenfolge ist das Planungsvorgehen durch das Programm gegliedert. Dank der Vorzüge der Antwortmengenprogrammierung ist das Programm hochflexibel. Weiterhin besteht die Möglichkeit, Nutzerwünsche oder -vorgaben flexibel zu berücksichtigen und zu erfüllen. Die Einbringung von Expertenwissen im Programm ermöglicht auch einem weniger erfahrenen Planer, hochwertige Varianten für die weitere Bewertung und Feinplanung zu generieren.

Ausstehend ist die Implementierung von Teilfunktionen und zusätzlichen Technologien sowie einer grafischen Benutzeroberfläche. An dieser Stelle ist besonderes Augenmerk darauf zu legen, das von seiner Programmierung hochflexible Programm nicht durch eine starre grafische Oberfläche zu stark einzuschränken.

LITERATUR

- [AG11] Atz, T.; Günthner, W.A.: Integrierte Lager-systemplanung. In: *Logistics Journal* (2011).
- [AKL+05] Anger, C.; Konczak, K.; Linke, T.; Schaub, T.: A glimpse of answer set programming. In: *Künstliche Intelligenz* 19 (1), S. 12-17, 2005.
- [Aus07] Ausschuss für Arbeitsstätten: *Fluchtwege und Notausgänge, Flucht- und Rettungsplan*, 2007.
- [BC09] Baker, P.; Canessa, M.: *Warehouse design: A structured approach*. In: *European Journal of Operational Research* 193, Nr. 2, S. 425–436, 2009 .
- [DFP09] Dovier, A.; Formisano, A.; Pontelli, E.: *An empirical study of constraint logic programming and answer set programming solutions of combinatorial problems*. In: *Journal of Experimental & Theoretical Artificial Intelligence* 21, Nr. 2, 2009, S. 79-121.
- [DMM09] Dallari, F.; Marchet, G.; Melacini, M.: Design of order picking system. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 42 (2009), Nr. 1-2, S.1-12.
- [Ell15] Ellinger, M.: *Beitrag zur agentenbasierten Konzeptplanung von Kommissioniersystemen*. Dortmund, TU Dortmund, Dissertation, 2015.
- [Fan95] Fang, D.: *Entwicklung eines wissensbasierten Assistenzsystems für die Planung von Lager-systemen*. Dortmund, TU Dortmund, Dissertation, 1995.
- [FEM9851] FEM Europäischer Verband für Fördertechnik: *Regalbediengeräte – Leistungsnachweis für Regalbediengeräte – Spielzeiten*, FEM9.851, 2003.
- [FUG04] Fonseca, D.J.; Uppal, G.; Greene, T.J.: A knowledge-based system for conveyor equipment selection. In: *Expert Systems with Applications* 26 (2004), Nr. 4, S.615-623.
- [Geb13] Gebser, M.: *Answer set solving in practice*. San Rafael, CA: Morgan & Clay-pool, 2013.
- [GGM10] Gu, J.; Goetschalckx, M.; McGinnis, L.F.: Research on warehouse design and performance evaluation: A comprehensive review. In: *European Journal of Operational Research* 203 (2010), Nr. 3, S. 539-549.

- [GKK+14] Gebser, M.; Kaminski, R.; Kaufmann, B.; Schaub, T.: *Clingo = ASP + Control: Extended Report*, 2014.
- [GKS92] Gray, A.E.; Karmarkar, U.S.; Seidmann, A.: Design and operation of an order-consolidation warehouse: Models and application. In: *European Journal of Operational Research* 58 (1992), Nr. 1, S. 14-36.
- [GL88] Gelfond, M.; Lifschitz, V.: *The stable model semantics for logic programming*. In: *The Journal of Symbolic Logic* 57 (1), 1988, S. 274-277.
- [GL91] Gelfond, M.; Lifschitz, V.: *Classical negation in logic programs and disjunctive databases*. In: *New Generation Computing* 9, Nr. 3-4, 1991, S. 365-385.
- [GS16] Günthner, W.A.; Staab, T.: *OptiMAL: Optimale Planung manueller Lagersysteme*. München, Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluß Logistik, TU München, Abschlussbericht AiF 18274N, 2016
- [Gud92] Gudehus, T.: Dimensionierung und Optimierung von Kommissioniersystemen. In: *Deutsche Hebe- und Fördertechnik* 7/8/9, S.48-57, S. 40-45, 1992.
- [Gud10] Gudehus, T.: *Logistik: Grundlagen – Strategien – Anwendungen*. s.l.: Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2010.
- [Gud12] Gudehus, T.: *Logistik I - Grundlagen, Verfahren und Strategien*. 4. Aufl., Berlin: Springer Vieweg, 2012.
- [HOL04] Hwang, H.; Oh, Y. H.; Lee, Y.K.: An evaluation of routing policies for order-picking operations in low-level picker-to-part system. In: *International Journal of Production Research* 42, Nr. 18, S.3873-3889, 2004.
- [HSB11] ten Hompel, M.; Sadowsky, V.; Beck, M.: *Kommissionierung: Materialflusssysteme 2 – Planung und Berechnung der Kommissionierung in der Logistik*. Berlin: Springer, 2011.
- [HSN07] ten Hompel, M.; Schmidt, T.; Nagel, L.: *Materialflusssysteme: Förder- und Lagertechnik*. 3. Aufl.. Berlin, Heidelberg: Springer, 2007.
- [Job13] Jobi, B.S.: *Entwicklung einer rechnergestützten Systematik zur funktionsbereichsübergreifenden Planung von Distributionszentren durch Einsatz der Graphentheorie*. Stuttgart, Universität Stuttgart, Dissertation, 2013.
- [Jün89] Jünemann, R.: *Materialfluß und Logistik - Systemtechnische Grundlagen mit Praxisbeispielen*. Berlin: Springer, 1989.
- [Kul05] Kulak, O.: A decision support system for fuzzy multi-attribute selection of material handling equipments. In: *Expert Systems with Applications* 29, Nr. 2, S. 310-319, 2005.
- [MM07] Meinhard, I.; Marquardt, H.-G.: Offenes Baukastensystem zur effizienten Dimensionierung von Materialflusssystemen. In: *Logistics Journal*, 2007.
- [McG12] McGinnis, L.F.: *An Object Oriented and Axiomatic Theory of Warehouse Design*. In: 12th International Material Handling Research Colloquium, Proceedings, 2012.
- [MSS14] McGinnis, L.F.; Schmidt, M.; Spee, D.: *Model Based Systems Engineering and Warehouse Design*. In: *Efficiency and Innovation in Logistics*, S. 161-178, 2014.
- [Sad07] Sadowsky, V.: *Beitrag zur analytischen Leistungsermittlung von Kommissioniersystemen*. Dortmund, TU Dortmund, Dissertation, 2007
- [SKH15] Schieweck, S.; Kern-Isberner, G.; ten Hompel, M.: *Intralogistik als Anwendungsgebiet der Antwortmengenprogrammierung – Potenzialanalyse*, In: *Logistics Journal: Proceedings*, 2015.
- [Som10] Sommer, T.: *RefPlan Logistik: Entwicklung einer referenzbasierten, prozessorientierten Planungsmethodik für Logistiksysteme am Beispiel der Paket- und Palettenlogistik*, Universität Stuttgart, Abschlussbericht AiF 15665 N, 2010.
- [VDI2411] VDI Verein Deutscher Ingenieure e.V.: *Begriffe und Erläuterungen im Förderwesen, VDI 2411*. Berlin: Beuth, 1970.
- [VDI2498] VDI Verein Deutscher Ingenieure e.V.: *Vorgehen bei einer Materialflussplanung, VDI 2498*. Berlin: Beuth, 2011.
- [VDI3561] VDI Verein Deutscher Ingenieure e.V.: *Testspiele zum Leistungsvergleich und zur Abnahme von Regalförderzeugen, VDI 3561*. Berlin: Beuth, 1973.
- [VDI3619] VDI Verein Deutscher Ingenieure e.V.: *Sortier- und Verteilsysteme für Stückgut, VDI 3619*. Berlin: Beuth, 2015.

- [Ven11] Venn, E.: *Beitrag zur simulationsgestützten Konzeptplanung von heterogen strukturierten Kommissioniersystemen*. Duisburg-Essen, Universität Duisburg-Essen, Dissertation, 2011.
- [VG11] Venn, E.; Geißen, T.: Mit acht Bausteinen erfolgreich planen: Kommissionieren mit System. In: *Hebezeuge Fördermittel* 51, Nr.6, S. 338-342, 2011.
- [Wis09] Wisser, J.: *Der Prozess Lagern und Kommissionieren im Rahmen des Distribution Center Reference Model (DCRM)*. Karlsruhe, Universität Karlsruhe (TH), Dissertation, 2009.
- [WS14] Wunderle, A.; Sommer, T.: *Planung von Intralogistiksystemen: Erfahrung und Augenmaß zählen*. Hebezeuge Fördermittel 54, 2014.

Steffen Schieweck, M.Sc. MS SCE (USA), wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Förder- und Lagerwesen und dem Lehrstuhl 1 der Fakultät Informatik an der TU Dortmund.

Prof. Dr. Gabriele Kern-Isberner, Professorin und Leiterin der Arbeitsgruppe „Information Engineering“ am Lehrstuhl 1 der Fakultät Informatik an der TU Dortmund.

Prof. Dr. Michael ten Hompel, Inhaber des Lehrstuhls für Förder- und Lagerwesen der TU Dortmund und geschäftsführender Leiter des Fraunhofer-Instituts für Materialfluss und Logistik.

Adresse: Lehrstuhl Informatik 1 – Information Engineering, TU Dortmund, Otto-Hahn-Str. 12, 44227 Dortmund, Germany,
Phone: +49 231 755-2045, Fax: +49 231 755-6555,
E-Mail: gabriele.kern-isberner@cs.uni-dortmund.de

Adresse: Lehrstuhl für Förder- und Lagerwesen, TU Dortmund, Joseph-von-Fraunhofer-Str. 2-4, 44227 Dortmund, Germany,
Phone: +49 231 755-2765, Fax: +49 231 755-4768,
E-Mail: steffen.schieweck@tu-dortmund.de