



DIPLOMARBEIT

Optimierung der Anlieferkette in der Automobilindustrie

am Institut für Optimierung und Diskrete Mathematik

unter Anleitung von O. Univ. Prof. Dr. Rainer Burkard und
Dipl.Ing. Frank Zinka

durch

Ruth Pittner

9430228

im Wintersemester 2009

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich habe.

Graz, am 18. Dezember 2009 Ruth Pittner

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei Magna Steyr Fahrzeugtechnik bedanken, die diese Arbeit erst ermöglicht und auch finanziert hat. Durch das gute Betriebsklima im Unternehmen kam es zu einer sehr angenehmen und produktiven Zusammenarbeit. Des weiteren bedanke ich mich auch bei den Mitarbeitern der Sparten C und X, die mir Daten zur Verfügung gestellt haben und Zeit für meine Fragen hatten.

Mein besonderer Dank richtet sich an Herrn Prof. Dr. Rainer Burkard und an Herrn Dipl. Ing. Frank Zinka für die Vermittlung, Betreuung und fachliche Unterstützung dieser Diplomarbeit.

Kurzfassung

Diese Diplomarbeit beschäftigt sich mit der Optimierung der Anlieferkette in der Automobilindustrie. Die Aufgabenstellung besteht in der Auswahl eines potentiellen Modulcenters und der Anlieferung von Teilen von diesem Modulcenter ins Werk von MAGNA STEYR Fahrzeugtechnik (MSF) innerhalb bestimmter Zeitfenster, sodass die Kosten minimal sind.

Die Arbeit gliedert sich in zwei Teile. Der erste behandelt den Vergleich mehrerer Modulcenter-Standorte, aus denen nach verschiedenen Kriterien beurteilt eines ausgewählt wird, mit dem Ziel die Gesamtkosten zu minimieren. Wichtige Einflussgrößen für die Auswahl sind die Anschließungskosten, die Fahrzeit vom Modulcenter zum Werk MSF, die Personal- und die Mietkosten im Modulcenter. Aufgrund dieser Voraussetzungen wurden nur Standorte in Ländern ausgewählt, die an Österreich angrenzen und sowohl niedrige variable Kosten als auch geringe Fixkosten aufweisen. Im Speziellen werden zwei Standorte in Ungarn und einer in Slowenien miteinander verglichen. Da genau ein Modulcenter ausgewählt werden soll, kann diese Aufgabe als ganzzahliges lineares Optimierungsproblem modelliert werden. Ein dafür in AMPL, einer mathematischen Modellierungssprache, geschriebenes Programm löst das Optimierungsproblem durch Verwendung des Simplex-Algorithmus.

Der zweite Teil beschäftigt sich mit dem Transport der Teile vom Modulcenter ins Werk von MSF. Die Teile sollen regelmäßig und innerhalb von vorgegebenen Zeitfenstern angeliefert werden, um möglichst wenig zusätzliche Lagerfläche im Werk nutzen zu müssen, da die externe Lagerung im Modulcenter weniger Kosten verursacht. Der Transport der Teile soll bezüglich der Kosten optimiert werden, indem die Anzahl der Lkws minimiert wird. Es handelt sich hier um ein Offline-Problem, da die pro Tag benötigte Menge von Teilen ist im Vorhinein schon bekannt ist. Zur Lösung wurde der First Fit Decreasing-Algorithmus kombiniert mit einer Bin Packing-Heuristik verwendet, in JAVA implementiert und ausgetestet. Auf diese Weise soll gewährleistet werden, dass trotz gewisser Restriktionen die Anzahl der benötigten Lkws möglichst klein ist, indem die Ladefläche des Lkws optimal genutzt wird.

Inhaltsverzeichnis

Eidesstattliche Erklärung	i
Danksagung	ii
Kurzfassung	iii
Teil 1. Standortplanung	1
Kapitel 1. Einleitung	1
1. Logistik	1
Kapitel 2. Problembeschreibung I	4
1. Logistik in der Automobilindustrie	4
2. Standortwahl	5
3. Prämissen	8
Kapitel 3. Modellierung	9
1. Einführung	9
2. Rechtliche Vorschriften	9
3. Eingabeparameter	11
4. Unkapazitierte einstufige Standortprobleme	12
5. Modellerweiterungen	19
Kapitel 4. Optimierungsmethode	22
1. Die Implementierung mit AMPL	22
Kapitel 5. Auswertung	28
1. Kostenvergleich der 3 Standorte	28
Teil 2. Transportplanung	27
Kapitel 6. Einleitung	28
Kapitel 7. Problembeschreibung II	29
1. Anlieferstrategien	29
2. Beladung der Lkws	30
Kapitel 8. Modell	32
1. Einführung	32
2. Definition des BP-Problems	35
3. 2-dimensionales Bin Packing	35

Kapitel 9. Lösungsverfahren	37
1. Gütegarantie von Approximationsalgorithmen[27]	37
2. Online-Verfahren für das 1-dimensionale BP-Problem	37
3. Offline-Verfahren für das 1-dimensionale BP-Problem	41
4. Offline-Verfahren für das 2-dimensionale BP-Problem	43
Kapitel 10. Implementierung	48
1. Problembeschreibung	48
2. Heuristik mit „walls“	49
3. Programm in Java	53
Kapitel 11. Auswertung	56
1. Globale Parameter	56
2. Produktion im MC in Messendorf	57
3. Produktion im MC in Pesnica	73
4. Optimierungspotential	79
5. Ergebnisse	80
Abbildungsverzeichnis	82
Tabellenverzeichnis	83
Anhang. Abkürzungsverzeichnis	85
Anhang. Literaturverzeichnis	88

Teil 1

Standortplanung

KAPITEL 1

Einleitung

1. Logistik

Unter Logistik subsumiert man alle Tätigkeiten, die in sozialen Systemen, wie in einem Unternehmen, im Zusammenhang mit dem Transport und der Lagerung von Gütern und mit dem Transport von Personen anfallen. Als Logistik bezeichnet man außerdem die wissenschaftliche Disziplin, die sich mit Problemen der Planung und Steuerung von Transport- und Lagersystemen sowie darin ablaufenden Prozessen beschäftigt. Besonders drei Problemkreise fallen in diese wissenschaftliche Disziplin, die Standortplanung, die Transportplanung und die Lagerhaltung, wobei letztere nur indirekt in dieser Diplomarbeit behandelt wird. Diese Problemkreise hängen jedoch eng miteinander zusammen, weil z.B. die Planung von Standorten in der Regel ohne gleichzeitige Planung von Transportwegen und -mitteln nicht sinnvoll ist [1].

1.1. Lagermöglichkeiten. Die räumlichen Kapazitäten eines Fertigungswerkes, insbesondere das Hauptlager, die Sequenzierflächen und der Vormontagebereich, sind begrenzt. Um die wachsenden logistischen Anforderungen innerhalb einer vorgegebenen Zeit bewältigen zu können, bedarf es einer Auslagerung gewisser Prozesse. Daher verwendet man verschiedene Anlieferstrategien, um sowohl die Transport- als auch die Lagerkosten zu minimieren. Dazu zählen neben der Methode der konventionellen Anlieferung direkt ins Hauptlager des Werks, „storage on wheel“ für Rohteile mit großem Volumen, wenn intern nur wenig Platz vorhanden ist, die Auslagerung in ein Modulcenter (MC) als Ort der Zwischenlagerung, Sequenzierung beziehungsweise auch Vormontage, die „Just In Time“- Anlieferung für sortenreine Teile und die „Just In Sequence“ Anlieferung für vorsequenzierte Teile. Wenn das Potential des Hauptlagers im Werk ausgeschöpft ist, und außerdem die Flächen- und Lohnkosten im Werk höher sind als in einem externen Lager, liegt die Überlegung nahe, ein neues MC zu bauen.

1.2. Standortauswahl. Ein großes Problem dabei ist die Entscheidung für den richtigen Standort, wobei sich mehrere Fragen ergeben.

1. Wie weit darf das Modulcenter entfernt sein, um eine regelmäßige Produktion gewährleisten zu können?

2. Kann das Zwischenlager in einem Niedriglohnland errichtet werden?
3. Für welches Modulcenter ist der Ressourceneinsatz von Lagerhaltung und Transport minimal?

Die Automobilzulieferer sind einem ständigen Wettbewerbsdruck ausgesetzt, der sie zwingt, um ihre Wettbewerbsposition zu stärken und konkurrenzfähig zu bleiben, die Produktion in Niedriglohnländer auszulagern. Im ersten Teil der Diplomarbeit werden die Gesamtkosten von Modulcentern, die an unterschiedlichen Standorten errichtet werden sollen, verglichen. Es wurden dabei besonders Niedriglohnländer betrachtet, die auch über den Vorteil einer sehr kurzen Anlieferzeit verfügen. Abgesehen von der Fahrzeit zwischen dem MC und dem Werk von Magna Steyr Fahrzeugtechnik (MSF) gibt es jedoch noch andere kritische Faktoren, die auf die Logistikkosten einen wichtigen Einfluss haben. Dazu zählen die Anschaffungskosten, die Flächenkosten, die Personalkosten, die Transportkosten, aber auch ein Risikofaktor, der mit der Entfernung zunimmt.

Daher wurde ein Blick nach Mitteleuropa geworfen, weil dort die eben genannten Kosten im Vergleich zu Österreich oft deutlich geringer sind. Aus wirtschaftspolitischer Sicht wurden vorrangig Länder in Betracht gezogen, die bereits der EU beigetreten sind. Ein Grund dafür ist die einfachere Zollabfertigung, da lange Wartezeiten an den Grenzen wegfallen. Abgesehen davon kann man von diesen Ländern auch eine politische Stabilität erwarten. Für diese Studie kamen schließlich zwei Standorte in Ungarn, Szentgotthart und Körmend sowie Pesnica in Slowenien in die nähere Auswahl. Diese Standorte verfügen über eine angemessene Produktionsqualität, die entsprechende Technologie, Fachpersonal und eine Lieferzeit innerhalb der gegebenen Vorholzeit. Die Gesamtkosten der Modulcenter sollen über einen Zeitraum von durchschnittlich 7 Jahren miteinander verglichen werden. Es kann angenommen werden, dass die Lohn- und Flächenkosten sowohl in Ungarn als auch in Slowenien innerhalb dieser Zeit unter dem österreichischen Niveau bleiben werden.

1.3. Transportplanung. Der zweite Teil der Diplomarbeit beschäftigt sich sowohl mit der Minimierung der Lagerkosten im Werk als auch mit der Minimierung der Transportkosten der Teile vom MC ins Werk MSF Graz. Durch eine produktionssynchrone Anlieferung können die Lagerkosten im Werk MSF Graz minimiert werden. Die Transportkosten hängen einerseits von der Entfernung des MC und andererseits vom Füllgrad der liefernden Lkws ab. Da der Standort schon im ersten Teil festgelegt wurde, soll hier der Füllgrad der Lkws optimiert werden. Eine optimale Ladematrix für jeden Lkw zu finden entspricht

einem Bin Packing Problem, einem kombinatorischen Optimierungsproblem, welches zu den **NP**-schweren Problemen zählt. Es gibt in der Literatur eine Vielzahl von Heuristiken zu diesem Problem, da man in vielen Bereichen der Industrie dafür Anwendungen findet.

KAPITEL 2

Problembeschreibung I

1. Logistik in der Automobilindustrie

In der Automobilindustrie hat die Logistik eine große Bedeutung. Das liegt einerseits an der Teilevielfalt, die angeliefert wird, und andererseits daran, dass viele Logistikdienstleister mit eingebunden sind. Daher gehen auch viele Logistikkonzepte von diesem Industriezweig aus. Beispielsweise wurde die JIT (Just In Time) Belieferung von Toyota entwickelt.

Die Flexibilität des Produktionssystems ermöglicht die Abdeckung einer großen Produktionsbandbreite, von der Kleinstserie bis zur Volumenproduktion, von der Spitzenabdeckung bis zur An- und Ausfertigung. Durch das Magna Steyr Produktionssystem erfährt die Automobilproduktion eine stabile Prozesssicherheit und somit einen sehr hohen Qualitätsstandard. Prozesse werden genau auf unterschiedlichste Anforderungen hin ausgerichtet und damit Kundenanforderungen abgesichert [2].

Die Anforderungen an die Logistik sind in der Automobilindustrie wegen der individuellen Kundenwünsche sehr groß. Jeder Kunde möchte seine eigenen Vorstellungen verwirklichen lassen. Daimler Chrysler ließ im Werk Sindelfingen 1998 eine Erhebung durchführen, wie viele Fahrzeuge identisch produziert wurden. Die Studie kam zu dem Ergebnis, dass bei einer Produktion von 420.000 Fahrzeugen jährlich statistisch nur 2,2 gleich gebaut worden sind [3].

Da die Lagerkapazität durch diese hohe Flexibilität sehr beansprucht wird, müssen viele Teile ausgelagert und an einem anderen Ort vorsequenziert bzw. vormontiert werden. Die Qualität der Teile und die rechtzeitige Lieferung von diesen muss gesichert bleiben. Ein Stillstand des Bandes aufgrund fehlender, weil zu langsam angelieferter, Teile würde hohe Kosten verursachen und sollte daher unbedingt vermieden werden.

„Die Logistik hat dafür zu sorgen, dass ein Empfangspunkt gemäß seines Bedarfs von einem Lieferpunkt

- mit dem richtigen Produkt
- im richtigen Zustand
- zur richtigen Zeit
- am richtigen Ort
- zu den minimalen Kosten

versorgt wird“ [4].

Die Logistik ist also dafür verantwortlich, dass die Produktion rechtzeitig mit den passenden Waren versorgt wird, die benötigt werden, um die Produktion aufrecht zu halten.

2. Standortwahl

Aufgrund mangelnder Kapazität im Werk müssen Teile ausgelagert werden. Es stellt sich nun die Frage, wo dieser neue Standort gebaut werden soll. Wie groß darf die maximale Entfernung sein, so dass eine regelmäßige Anlieferung gesichert ist? Über welche Infrastruktur verfügt er bereits? Für welche Standortwahl sind die Gesamtkosten, also Erschließungskosten und Kosten für Arbeiter, Fläche und Transport minimal?

Zur Produktionsverlagerung eignen sich vor allem Staaten aus Mitteleuropa, besonders Niedriglohnländer, um Kosten zu sparen. Auf diese Weise ist es möglich dem großen Wettbewerbsdruck stand zu halten. Bei der Auswahl der für den Betrieb relevanten Standortfaktoren wurden nicht nur die traditionellen Aspekte wie die Arbeitskosten, die Vorleistungskosten, die Transport- und Mietkosten, sondern auch die Infrastruktur, die Qualität des Personals sowie politische Standortfaktoren berücksichtigt. „Es hat sich gezeigt, dass für die Strategie der Kostenreduktion die nachhaltig niedrigen Lohnkosten ein Hauptkriterium bei der Vorauswahl wie auch zur Bewertung eines Standortes darstellen“ [5].

Aus diesen Gründen kommen Slowenien und Ungarn in die nähere Auswahl. Beide Staaten gehören so wie auch Österreich der Europäischen Union an, die eine gemeinsame Außen- und Sicherheitspolitik betreibt, was wiederum die politische Stabilität dieser Länder garantiert. Da die Warenverkehrsfreiheit zu den Grundfreiheiten innerhalb der Europäischen Gemeinschaft gehört, lassen sich langwierige Zollabfertigungen ausschließen. Sie wird durch die Zollunion und dem Verbot von mengenmäßigen Ein- und Ausfuhrbeschränkungen sowie Maßnahmen gleicher Wirkung begründet (Art. 23 ff. EG-Vertrag). Die Warenverkehrsfreiheit gilt für alle Waren im Sinne von Art. 23 Abs. 2 EG-Vertrag („... die aus den Mitgliedstaaten stammenden Waren sowie für diejenigen Waren aus dritten Ländern, die sich in den Mitgliedstaaten im freien Verkehr befinden“) [6].

Im Übereinkommen von Schengen ist vereinbart auf Kontrollen des Personenverkehrs an gemeinsamen Grenzen zu verzichten. Mittlerweile wird das Übereinkommen von Schengen in 25a Ländern Europas angewandt, von denen 22 Mitgliedsländer der Europäischen Union (EU) angehören. Von den EU-Ländern nehmen Großbritannien und Irland nur eingeschränkt am Schengener Abkommen teil. Zusätzlich gilt es auch in den Nicht-EU-Staaten Island und Norwegen und Schweiz. Bulgarien, Rumänien und Zypern werden das Abkommen zu einem späteren

Zeitpunkt anwenden. Sowohl in Slowenien als auch in Ungarn wurde dieses Abkommen bereits ratifiziert.

Ein anderes wichtiges Kriterium für die Wahl des Standortes ist die Erreichbarkeit des Werks MSF innerhalb einer vorgegebenen Zeit. Zur genaueren Berechnung der Fahrzeit zwischen dem MC und dem Werk MSF wird die Strecke in einen Autobahnanteil (A) und in einen Anteil, der auf der Landstraße (L) zurückgelegt wird, geteilt.



2.1. Standort Slowenien.

MC ↔ Entfernung Werk Graz

Ort	Entfernung	A: 70km/h	L: 40km/h	Fahrzeit
Pesnica	63 km	48 km	15 km	63 min

TABELLE 1. Entfernung zum slowenischen MC

2.1.1. *Bewertung.* Ein großer Vorteil dieses Standortes besteht in der geringen Entfernung zum Werk MSF in Graz. Da auch der Anteil, der auf der Autobahn gefahren werden kann, mit 76% relativ hoch ist, verkürzt sich die Fahrzeit dementsprechend. Zwar wurde mit 01.07.2008 eine Autobahnmaut eingeführt, diese gilt aber nicht für Lkws. Somit ist keine Erhöhung der Lkw-Fixkosten zu erwarten. Es ist anzunehmen, dass die Kraftstoffpreise weiterhin deutlich unter dem österreichischen Niveau bleiben werden.

Slowenien bietet aber noch einen weiteren Vorteil, eine gemeinsame

Währung mit Österreich seit Jänner 2007. Somit besteht kein Wechselkursrisiko für dieses Projekt.

2.2. Standort Ungarn.

MC ↔ Werk Graz

Ort	Entfernung	A: 70km/h	L: 40km/h	Fahrzeit
Szentgotthart	77 km	43 km	34 km	88 min
Körmend	100 km	43 km	57 km	122 min

TABELLE 2. Entfernungen zu ungarischen MC

2.2.1. *Bewertung.* Die Autobranche wurde in den letzten Jahren zum Motor der ungarischen Exportwirtschaft. Im Rába-Werk in Szentgotthart, das vom ungarischen Unternehmen nie in Betrieb genommen wurde, baute 2006 General Motors Powertrain als Mieter 444.000 Motoren, ausschließlich für den Export [7]. (Rába baut Fahrgestelle, Getriebe und andere Lkw-Teile sowie ganze Busse.)

Körmend ist heute eines der Wirtschaftszentren des westlichen Landesteils. Das wichtigste Gebiet der Wirtschaft ist die Industrie mit zahlreichen privaten Unternehmen, die mit ausländischen Kapital Pharmazeutika, Schuhe, Möbel, elektronische Bauteile u.v.m. herstellen. D.h., die nötige Infrastruktur ist in beiden Standorten bereits vorhanden.

Die Entfernungen zwischen Szentgotthart bzw. Körmend und Graz ist deutlich größer als zwischen Pesnica und Graz. Auch die Fahrstrecke, die auf der Autobahn zurückgelegt werden kann, beträgt relativ gesehen nur 56% bzw. 43%. Die ungarischen Standorte bleiben trotzdem interessant für einen Vergleich, weil sowohl die Erschließungskosten als auch die Lohnkosten dort geringer sind.

Ungarn wollte den Euro 2010 als Währung einführen. Wegen des kontinuierlich hohen Staatsdefizits wird das Erreichen dieses Ziels von Wirtschaftsexperten und der Europäischen Zentralbank angezweifelt. Derzeit erfüllt Ungarn mit einer Neuverschuldung von zehn Prozent des Bruttoinlandsprodukts und der hohen Inflation nicht die Konvergenzkriterien. Obwohl der ungarische Ministerpräsident Ferenc Gyurcsány immer noch das Ziel für realistisch hält, wird eher mit einem Beitritt Ungarns zur Euro-Zone in den Jahren 2013 bis 2016 gerechnet [8]. Bis dahin bleibt jedoch ein Wechselkursrisiko zwischen dem ungarischen Forint und dem Euro bestehen.

3. Prämissen

Die durchschnittliche Projektdauer wird mit 7 Jahren bemessen. Für diese Zeitspanne ist der Standort des kostengünstigsten Modulcenters zu ermitteln. Im ersten Teil dieser Diplomarbeit wird davon ausgegangen, dass täglich 426 Autos produziert werden sollen.

Die Größe der Lager-, Sequenzier- und Vormontageflächen ist durch den maximalen Bedarf an Gütern, der für die Produktion benötigt wird, gegeben. Es wird vorausgesetzt, dass alle Modulcenter über genügend Kapazität verfügen. Unterschiede bestehen in den Errichtungskosten beziehungsweise in den Miet- und Arbeitskosten.

Die Einsatzzeit der Arbeiter ist variabel. Es kann je nach Auftragslage entweder im 1-, 2- oder 3-Schichtbetrieb gearbeitet werden. Die Höhe der anfallenden Lohnkosten hängt vom Standort des Modulcenters ab.

Einzelne Teile einer Sorte werden zu Gebinden zusammengefasst. Die Gebindegröße kann je Sorte variieren. Aus den Gebinden werden, wenn es die Höhe zulässt, Stapel gebildet. Die Stapelhöhe darf die Lkw-Höhe von 3 m nicht überschreiten. Wird ein Lkw nicht voll beladen, ist trotzdem der gesamte Lkw einschließlich des Fahrers zu bezahlen! Es gibt mehrere Gründe, warum ein Lkw nicht voll beladen sein kann. Einerseits ist oft die Zeit zum Warten auf die Signale, zum Zusammenstellen, eventuellen Sequenzieren und/oder Vormontieren und zum Laden sehr beschränkt. Andererseits kann es auch passieren, dass noch eine Restmenge geliefert werden muss, um das Produktionssoll pro Tag erfüllen zu können, so dass der Lkw nicht ausreichend beladen ist. Andere Gründe, die für eine schlechte Auslastung verantwortlich sind, bestehen in der Abmessung der Gebinde und der Vorschrift, dass ein Lkw nur bestimmte Sorten von Teilen kombiniert laden darf.

Die Transportkosten vom Dock zum Band werden nicht berücksichtigt, denn sie stellen einen konstanten Term in der Zielfunktion dar. Es ist dennoch wichtig, dass die Teile ans richtige Dock geliefert werden. Innerhalb des Werksgeländes ist es zwar prinzipiell möglich mit Hilfe von Gabelstaplern Teile von einer Produktionshalle in eine andere zu fahren, aber nur mit einem bedeutenden Kostenaufwand. Zudem ist es aus Zeitgründen normalerweise nicht möglich mehrere Docks anzufahren.

KAPITEL 3

Modellierung

1. Einführung

„Viele ökonomische Entscheidungen sind damit verbunden, gewisse Gegenstände anzuordnen oder auszuwählen und Standorte zu bestimmen, um eine gegebene Nachfrage effizient zu befriedigen. Zu den typische Anwendungen zählen unter anderem Anfertigungsanlagen, Lagerhallen, Warenlager, Büchereien, Feuerwehrzentralen, Spitäler, Basisstationen für drahtlose Dienste (wie z.B. Fernsender oder Mobilfunkdienste), etc.. Diese Probleme haben gemeinsam, dass eine Menge von Gegenständen, jede mit einer speziellen Position, ausgewählt werden muss, mit dem Ziel, den Bedarf des Kunden oder Nutzers bestmöglich zu erfüllen [9].“

Die Standortwahl für ein neues MC erfolgt aufgrund vieler entscheidungsrelevanter Faktoren. Nachdem die politischen Faktoren geprüft worden sind, eine geeignete Infrastruktur sichergestellt worden ist und außerdem ausreichend viele qualifizierte Arbeitskräfte an diesen Standorten zur Verfügung stehen, können die verbleibenden Standorte, die es in die engere Auswahl geschafft haben, bezüglich der Gesamtkosten verglichen werden. Sie unterscheiden sich im wesentlichen nur noch in den fixen Erschließungskosten, den variablen Transport-, Arbeits- und Flächenkosten sowie in der zeitlichen Entfernung zum Werk. Um diese Standorte vergleichbar zu machen, berechnet man die Gesamtkosten jeder Alternative und wählt jene mit den minimalen Gesamtkosten unter Berücksichtigung, dass die Teile innerhalb einer vorgegebenen Zeit angeliefert werden müssen. Für die Modellierung wurde ein Arbeitstag mit zwei Schichten à 8 Stunden für die Arbeiter betrachtet. Bei den Lkw-Fahrern wurde mit einer durchschnittlichen Lenkzeit von 9 Stunden pro Tag gerechnet, so dass ein Lkw in 2 Schichten 1080 Minuten genutzt werden kann.

2. Rechtliche Vorschriften

2.1. Rechtliche Vorschriften für das österreichische und europäische Transportgewerbe. Nachfolgende Vorschriften gelten grundsätzlich für Lenker von Kraftfahrzeugen, die der gewerblichen Güterbeförderung dienen und deren höchstzulässiges Gesamtgewicht 3,5

Tonnen nicht übersteigt. Diese Rechtsvorschriften gelten sowohl in Österreich als auch in der EU [10]:

- Arbeitsgesetz (insbesondere AZG, Abs. 4, §§13 ff.)
- Arbeitsruhegesetz
- Kraftfahrgesetz
- Europäisches Abkommen über die Arbeit des im internationalen Straßenverkehr beschäftigten Fahrpersonals
- Kollektivvertrag für das Güterbeförderungsgewerbe

Der Fahrer muss die gesetzlich vorgeschriebenen Lenkzeiten, Lenkpausen, Ruhezeiten und Ruhepausen einhalten, um einerseits die Verkehrssicherheit nicht zu gefährden und andererseits um seinen privaten Angelegenheiten und seinem Schlafbedürfnis nachzukommen. Die Kontrolle dieser Zeiten erfolgt mit Hilfe eines digitalen Kontrollgeräts, mit dem jedes Fahrzeug ausgestattet werden muss. Auf diese Weise können die Tätigkeit des Fahrers auf seiner Fahrkarte innerhalb eines Zeitraums von 28 Tagen und die des Fahrzeugs über einen Zeitraum von einem Jahr kontrolliert werden.

2.2. Lenkzeit. Als Lenkzeit wird die Zeit bezeichnet, die der Fahrer damit verbringt, ein Kraftfahrzeug zu steuern, insbesondere auch verkehrsbedingte Standzeiten an Ampeln, Kreuzungen oder im Stau. Unter der Tageslenkzeit wird die Zeit zwischen zwei Ruhezeiten oder zwischen einer täglichen und einer wöchentlichen Ruhezeit verstanden. Die Tageslenkzeit ist auf 9 Stunden beschränkt, zweimal pro Woche darf sie auf 10 Stunden ausgedehnt werden, wobei die Lenkzeit in einer Woche 56 Stunden nicht überschreiten darf. In zwei aufeinander folgenden Wochen darf sie höchstens 90 Stunden betragen.

2.3. Lenkpausen. Nach spätestens 4,5 Stunden muss eine Lenkpause von 45 Minuten eingehalten werden. Alternativ kann diese auch durch maximal 3 Lenkpausen von mindestens 15 Minuten ersetzt werden. Diese Bedingung muss nicht explizit berücksichtigt werden, weil die Zeit für das Be- und Entladen der Lkws auch als Pause für die Lkwfahrer genutzt wird. Außerdem liegt keiner der in Betracht kommenden Standorte weiter als 4,5 Stunden vom Werk MSF entfernt.

2.4. Ruhezeiten. Für die tägliche Ruhezeit bei Ein-Fahrer Besetzung gilt, dass der Lenker innerhalb von 24 Stunden eine zusammenhängende Ruhezeit von mindestens 11 Stunden einlegen muss. Drei mal in der Woche kann die tägliche Ruhezeit auf 9 Stunden reduziert werden. Diese Reduzierung muss aber bis zum Ende der darauf folgenden Woche in einer zusätzlichen mindestens 8 Stunden langen Ruhezeit kompensiert werden. Ebenso besteht die Möglichkeit, die Ruhezeit innerhalb von 24 Stunden zu teilen. In diesem Fall erhöht sich die Ruhezeit aber von 11 auf 12 Stunden, wobei ein Teil der Ruhezeit mindestens

8 Stunden betragen muss und die restlichen Ruhezeiten mindestens eine Stunde betragen müssen.

Jeder Lenker muss wöchentlich eine Ruhezeit von mindestens 45 zusammenhängenden Stunden einlegen. Eine tägliche wird durch die wöchentliche Ruhezeit ersetzt. Zwischen zwei wöchentlichen Ruhezeiten dürfen höchstens 6 Tage liegen.

(Für lange Strecken kommt auch eine Zwei-Fahrer Besetzung in Betracht, wobei jeder Lenker eine tägliche Ruhezeit von mindestens 8 Stunden innerhalb von 30 Stunden einlegen muss.)

2.5. Einsatzzeit. Unter der Einsatzzeit versteht man die zwischen zwei Ruhezeiten anfallende Arbeitszeit und jede Arbeitsunterbrechung. In die Einsatzzeit fallen u.a. Be- und Entladung des Lkws oder Wartezeiten. Bei Ein-Fahrer-Besetzung berechnet sich die maximale Einsatzzeit wie folgt:

$$\text{Einsatzzeit} = 24 \text{ Stunden} - \text{tägliche Mindestruhezeit}$$

D.h., sie beträgt maximal 16 Stunden bei nur einem Fahrer pro Lkw.

2.5.1. *Tageslenkzeit.* Während dieser darf der Lenker das Kraftfahrzeug steuern. Sie darf 9 Stunden, bzw. 10 Stunden pro 24 Stunden, nicht überschreiten. Eine verlängerte Wartezeit verringert somit die Tageslenkzeit. Es ist daher vorteilhaft, kein Dock von 2 oder mehr Fahrzeugen gleichzeitig zu beliefern, um Wartezeiten zu vermeiden und die Tageslenkzeit maximal ausnutzen zu können [10].

$$\text{Tageslenkzeit[h]} = \left(\frac{L_i}{v} + \frac{A_i}{w} \right) * \text{Fahrten}_i \leq 9$$

Unter Fahrten_i wird hier die gesamte Anzahl der Fahrten je Lkw zwischen dem Werk MSF und dem MC_i verstanden.

3. Eingabeparameter

3.1. Tagesbedarf. Die Tagesproduktion an Autos kann abhängig von der Auftragslage variieren. Es ist trotzdem möglich für einen kurzen Zeitraum den Tagesbedarf an Teilen von jeder Teilesorte zu bestimmen. Mit anderen Worten, die Anzahl der Teile, die täglich benötigt werden, ist im Vorhinein bekannt. Zudem ist für jedes Teil eine bestimmte Vorholzeit gegeben, ein Zeitfenster, innerhalb dessen es angeliefert werden muss.

3.2. Gebindedaten. Teile werden je nach Sorte in Gebinden zusammengefasst. Es kann angenommen werden, dass die Gebinde wiederverwendet werden. Die Anzahl der Teile je Gebinde ist je nach Sorte unterschiedlich. Von jedem Gebinde sind die Abmessungen, Länge,

Breite, Höhe, die Anzahl der transportierbaren Teile und ein Klappfaktor bekannt. Unter einem Klappfaktor versteht man, dass beim Rücktransport vom Werk zum MC die Höhe des Gebindes verringert werden kann, da das Gebinde leer ist. Ein Klappfaktor von 0,5 bedeutet, dass die Höhe des Gebindes auf die Hälfte reduziert werden kann. Das hat den Vorteil, dass ein Lkw beim Rücktransport mehr Gebinde fassen kann. Daher muss nicht jeder Lkw vor der Rückfahrt wieder mit Leergut beladen werden, was wiederum Zeit spart.

3.3. Stapel. Unter einem Stapel versteht man übereinander geschichtete, sortenreine Gebinde. Die Stapelhöhe ist durch die Lkw-Höhe begrenzt.

3.4. Lkw. Zum Transport der Teile wird nur eine Art von Lkw betrachtet. D.h., alle Lkws sind von gleicher Länge, Breite und Höhe und verursachen auch die gleichen Kosten bezüglich Fahrer und Treibstoffverbrauch.



Art	Länge	Breite	zul.Breite	Höhe
Jumbo	13,6m	2,5m	2,45m	3m

TABELLE 3. Lkw-Abmessungen

4. Unkapazitierte einstufige Standortprobleme

Die Aufgabenstellung, das kostengünstigste MC zu finden, kann als unkapazitiertes einstufiges Standortproblem modelliert werden. Diese Probleme sind in der Literatur als *Uncapacitated Facility Location Problem*, kurz **UFLP**, bzw. unter dem Namen *Simple Plant Location Problem* oder *Simple Warehouse Location Problem* bekannt. Sie zählen zu den ganzzahligen linearen Optimierungsaufgaben.

4.1. Notation. Zur Definition der verschiedenen Modelle und Beschreibungen der Lösungsverfahren werden folgende Symbole verwendet werden:

$i = 1, \dots, m$	...	die MC
m	...	Anzahl der Modulcenter
$j = 1, \dots, n$	...	die Kunden
n	...	Anzahl der Kunden
a_i	...	Lagerkapazität
c_{ij}	...	Transportkosten vom MC_i zum Kunden j
$k = 1, \dots, l$	...	Anzahl der Lkws
k_i	...	Anzahl der benötigten Lkws abhängig von der Entfernung des MC_i
pay	...	Stundensatz für Lkw + Fahrer
s	...	Arbeitsstunden / Tag
A_i	...	km auf der Autobahn zw. MC_i und dem Werk
L_i	...	km auf der Landstraße zw. MC_i und dem Werk
v	...	mittlere Geschwindigkeit auf der Autobahn
w	...	mittlere Geschwindigkeit auf der Landstraße
$x_{ij} \in \{0, 1\}$	...	1 ... MC_i beliefert den Kunden j 0 ... MC_i liefert nicht
\hat{x}_{ij}	...	vom Lager i zum Kunden j transportierte Gütermenge
$y_i \in \{0, 1\}$	...	1 ... MC wird gebaut 0 ... MC wird nicht gebaut
f_i	...	Errichtungskosten für MC_i
r_i	...	Risikofaktor, der von der Entfernung des MC_i abhängt

Im Buch „Combinatorial Optimization“ von B.Korte und J.Vygen [9] wird auf Seite 537 das unkapazitierte Standortproblem so formuliert:

Problemstellung: Seien m, n natürliche Zahlen und $I = 1 \dots m$ eine endliche Menge von möglichen Standorten mit festen Errichtungskosten $f_i \in \mathbb{R}^+$, falls das MC $_i$, $i \in I$ gebaut wird, und $J = 1 \dots n$ eine endliche Menge von Kunden. Weiters seien $c_{ij} \in \mathbb{R}^+ \forall i \in I$ und $j \in J$ die Transportkosten vom MC zum Kunden, was in Figur 4.1 veranschaulicht wird.

Ziel ist es, eine Teilmenge X von Standorten zu bestimmen, an denen Modulcenter gebaut werden, und eine Funktion $\sigma: J \rightarrow X$, welche eine Zuweisung von Kunden zu den errichteten Modulcentern bestimmt, so festzulegen, dass die Summe der Errichtungs- und Transportkosten ein Minimum ist.

$$\min \sum_{i \in I} f_i * y_i + \sum_{j \in J} c_{\sigma(j)j} * x_{\sigma(j)j}$$

Folgende Nebenbedingungen müssen erfüllt sein:

- (1) $x_{\sigma(j)j} \leq y_i$ für $i = 1 \dots m$ und $j = 1 \dots n$
- (2) $\sum_{i=1}^m x_{\sigma(j)j} = 1$ $\forall j = 1 \dots n$
- (3) $x_{\sigma(j)j} \in \{0, 1\}$ für $j = 1 \dots n$
- (4) $y_i \in \{0, 1\}$ für $i = 1 \dots m$

In den Transportkosten zwischen dem MC und dem Kunden können variable Kosten der Lagerhaltung am potentiellen Standort berücksichtigt werden. Bei der Modellierung für diese Diplomarbeit wurde aber von fixen Lagerhaltungskosten ausgegangen. Es gelten die gleichen Stückkosten für alle Teile.

Für die Implementierung wird dieses ganzzahlige lineares Programm wie folgt formuliert:

$$(5) \quad \min \sum_{i \in I} f_i y_i + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} c_{ij} x_{ij}$$

wobei folgende Restriktionen erfüllt sein müssen:

- (6) $x_{ij} \leq y_i$ für $i = 1 \dots m$ und für $j = 1 \dots n$
- (7) $\sum_{i=1}^m x_{ij} = 1$ $\forall j = 1 \dots n$
- (8) $x_{ij} \in \{0, 1\}$ für $i = 1 \dots m$ und $j = 1 \dots n$
- (9) $y_i \in \{0, 1\}$ für $i = 1 \dots m$

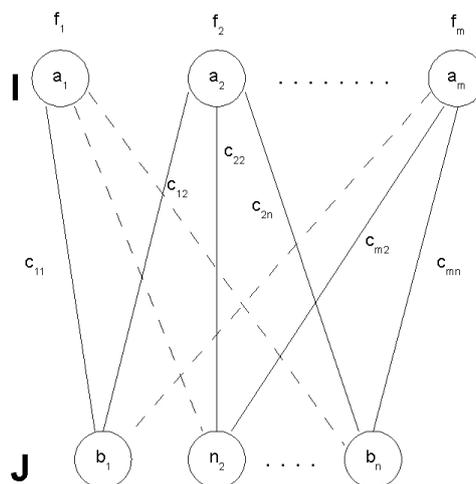


ABBILDUNG 1. Einstufiges Standortproblem

Die Bedingungen (6) stellen sicher, dass ein Kunde j nur von höchstens einem errichteten Lager i beliefert wird. Außerdem gilt, wenn von einem Standort nichts geliefert wird, wird er auch nicht gebaut werden, denn das würde die Minimalitätsforderung an den Zielfunktionswert verletzen. Bedingung (7) regelt, dass jeder Kunde von genau einem Standort i beliefert wird. Sie kann auch so abgeändert werden, dass jeder Kunde von mindestens (höchstens) ein Standort beliefert wird ($\sum_{i=1}^m x_{ij} \leq 1$ (≥ 1) $\forall j$). In Restriktion (8) besagt $x_{ij} = 1$, dass Kunde j von MC_i beliefert wird. Falls $x_{ij} = 0$ gilt, wird der Kunde j nicht von MC_i beliefert. In (9), bedeutet $y_i = 1$, dass MC_i errichtet wird und $y_i = 0$, dass es nicht gebaut wird. Mit c_{ij} werden die Transportkosten von Standort i zum Kunden j bezeichnet.

ANMERKUNG 1. Beim UFLP kann die Lagerkapazität $a_i := \infty$ $\forall i$ gesetzt werden, denn es existieren keine Kapazitätsrestriktionen, da alle Standorte über genügend Ressourcen verfügen, um den/die Kunden alleine beliefern zu können.

4.2. Modell. Da angenommen werden kann, dass die Modulcenter, die verglichen werden sollen, ausreichend groß gebaut werden können und über genügend Arbeitskräfte verfügen, um den Bedarf des Werks MSF zu decken, entspricht diese Problemstellung einem unkapazitierten 1-Standortproblem. Die Projektdauer beträgt 7 Jahre. Es werden mehrere Modulcenter bezüglich ihrer Gesamtkosten, die im Laufe dieses Projektes anfallen, verglichen. Jenes Modulcenter mit den geringsten Gesamtkosten soll dann gebaut werden.

Zur genaueren Spezifikation der Zielfunktion werden die Transportkosten in folgende Faktoren zerlegt:

- Anzahl der Lkw (k_i), die für die Anlieferung der Teile pro Tag notwendig sind
- Lkwkosten für einen Tag (pay)
- Stundensatz des Lkw-Fahrers ($stdcost$)
- Schichtzeit ($s = 8$ bzw. 16 oder $24h$)
- Risikofaktor (r_i)

$$Transportkosten = \sum_{i=1}^m [pay * k_i + 2s * stdcost * (1 + r_i)]$$

Die genaue Berechnung der benötigten Lkws pro Tag erfolgt im zweiten Teil dieser Diplomarbeit unter Berücksichtigung von vorgegebenen Zeitfenstern für die Anlieferung jeder Sorte, der Kapazität des Lkws und der Lieferung der Teile ans richtige Dock im Werk. Auch der Füllgrad (FG), die prozentuelle Auslastung der Lkws, wird im zweiten Teil dieser Diplomarbeit optimiert.

Für dieses Modell wird eine Schätzung des Liefervolumens für einen Tag vorgenommen. Der FG der Lkws kann variabel gewählt werden. Je höher der FG, desto weniger Fahren und desto weniger Lkws werden für den Transport der Teile benötigt. Es ist günstig, diese zwei Parameter, das Liefervolumen und den FG frei wählen zu können, denn sie hängen von verschiedenen Faktoren ab, wie z.B. der schwankenden Tagesproduktion, unterschiedlichen Lieferzeiten, der Größe der Teile, der Lagerkapazität im Werk u.v.m..

Ein variabler FG des Lkws ist für die Kalkulation der Kosten sehr interessant, denn einerseits gilt, je effizienter angeliefert werden kann, desto weniger Lkws und Fahrer benötigt man. Andererseits ist das Hauptlager im Werk räumlich beschränkt und kostenintensiv. Daher ist man an einer möglichst regelmäßigen Anlieferung interessiert, auch wenn der FG des Lkws nicht maximal ist. Aus diesem Grund wird das in AMPL programmierte Modell mit verschiedenen FG simuliert werden.

DEFINITION 1. (*Rundlauf = RL*)

*RL := Be- und Entladung von Vollgut +
Hin- und Rückfahrt zwischen MC und Werk +
Be- und Entladung von Leergut*

Ein Rundlauf, wie in Abbildung 2 dargestellt, besteht aus der Zeit für Be- und Entladung des Lkws mit befüllten Gebinden, der Hin- und Rückfahrzeit zwischen Modulcenter und Werk und der Zeit für Be- und Entladung des Leerguts.

Der Risikofaktor bezieht sich auf alle Unfälle im Schwerverkehr innerhalb eines Jahres in Österreich. Der Risikofaktor wurde mit Hilfe von Daten der Statistik Austria aus dem Jahr 2007 ermittelt. Es gab 1853 Tote in einem Jahr bei Unfällen, an denen Lkw über 3,5 Tonnen, Sattelkraftfahrzeuge oder Tankwagen beteiligt waren. Die Zahl der Unfälle mit tödlichem Ausgang ist jedoch seit einigen Jahren rückläufig. Ein Unfall verursacht eine durchschnittliche Lieferverzögerung von 3 Stunden.

Der Risikofaktor (r) berechnet sich wie folgt für einen Arbeitstag (AT):

$$r = \text{Anzahl der RL} * \text{Distanz der RL} * \text{Unfälle je km} / 225$$

ANMERKUNG 2. *Die Anzahl der Unfälle wird statistisch jährlich erfasst. Man rechnet mit 225 Arbeitstagen pro Jahr, die sich aus 365 Tagen abzüglich 52 Wochenenden, 13 gesetzlichen Feiertagen, aber nur jenen davon, die auf einen Wochentag fallen, und 25 Tagen Urlaub zusammensetzen.*

Das Volumen aller zu liefernder Teile durch das Fassungsvermögen des Lkws dividiert ergibt die Anzahl der zu liefernden Fuhren. Die Anzahl der benötigten Lkws pro Tag berechnet sich, indem die Anzahl der täglichen Fuhren durch die Anzahl der täglich möglichen Rundläufe zwischen MC_i und dem Werk MSF dividiert und abgerundet wird.

Die Fahrzeit zwischen MC und Werk berechnet sich anteilmäßig aus der Fahrzeit auf der Autobahn und auf der Landstraße, wobei eine mittlere Geschwindigkeit von 70 km/h auf Autobahnen und eine von 40 km/h auf Landstraßen angenommen wurde. Die Anzahl der Rundläufe eines Lkws pro Tag ist natürlich auch durch die vorher beschriebenen, gesetzlich vorgeschriebenen Lenkzeiten eingeschränkt.

Folgende Restriktionen müssen noch beachtet werden:

1. Ladevolumen des Lkws abhängig vom Füllgrad
2. Lenkzeit des Lkw-Fahrers $\leq 9h$
3. Vorlaufzeit (VLZ) je Sorte \geq Fahrzeit
4. mittlere Lkw-Geschwindigkeit auf der Landstraße: 40 km/h
mittlere Lkw-Geschwindigkeit auf der Autobahn: 70 km/h
5. Bau genau eines MCs

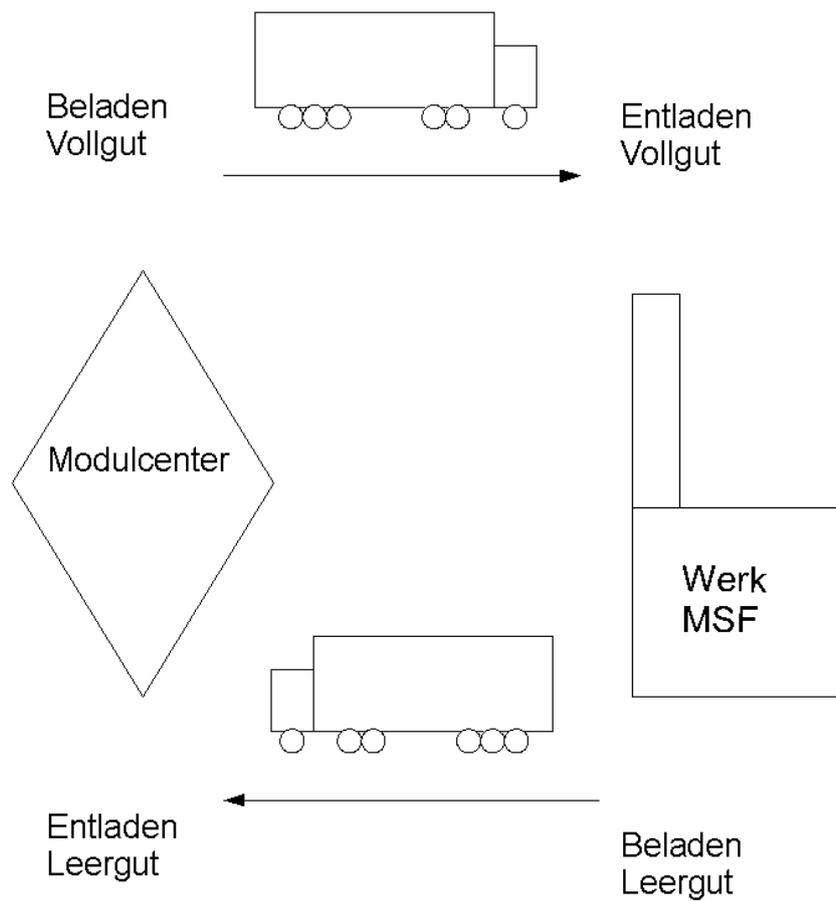


ABBILDUNG 2. Rundlauf

DEFINITION 2. (*Vorlaufzeit = VLZ*)

$VLZ :=$ Vormontage im MC + Montagetakte/Sorte * Stückzahl +
 Beladung + Transport + Entladung +
 Be- und Entladung von Leergut +
 Bandanstellung + Zeitpuffer

Unter Vorlaufzeit (VLZ) wird die Prozesszeit zwischen dem Eintreffen des Signals vom Werk MSF an das MC für die Lieferung eines Teils und der Bereitstellung am Band verstanden. Vom Werk MSF werden Signale zum MC geschickt, damit mit der Vormontage, Sequenzierung bzw. der Zusammenstellung der Teile begonnen werden kann. Dann müssen vorbereitende Tätigkeiten für die neue Lieferung gemacht werden. Die fertigen Teile werden in der richtigen Reihenfolge in die Gebinde gepackt und anschließend auf den Lkw verladen und zum Werk transportiert. Dort müssen sie am richtigen Dock entladen werden. Zur Vorlaufzeit zählt man zusätzlich noch die Bandanstellung und einen Zeitpuffer. Die Vorlaufzeit besagt, dass die Teile mit einer bestimmten Frequenz angeliefert werden müssen. Sie ist immer einzuhalten, um Bandstillstände zu vermeiden. Sie darf aber auch nicht zu sehr unterschritten werden, denn sonst wird die Kapazität des Hauptlagers im Werk überbelastet.

5. Modellerweiterungen

Im folgenden werden einige Varianten des Standortproblems näher beschrieben. Zuerst wird auf das kapazitierte einstufige Standortproblem eingegangen und danach werden kurz die mehrstufigen Problemstellungen erklärt.

5.1. Kapazitiertes, einstufiges FLP. Das kapazitierte Problem unterscheidet sich vom unkapazitierten durch folgende Annahmen:

- Die Kapazität der an den potentiellen Standorten errichtbaren Lager ist beschränkt.
- \hat{x}_{ij} bezeichnet die vom Lager i zum Kunden j transportierte Gütermenge.
- Die Transportkosten c_{ij} sind als Geldeinheiten je beförderter Mengeneinheit definiert.

Mit a_i wird die maximale Kapazität des Lagers i bezeichnet beziehungsweise wird mit Hilfe von b_j der Bedarf des j -ten Kunden beschrieben. y_i bleibt weiter eine Binärvariable und zeigt an, welches Lager errichtet wird. Die Zielfunktion lässt sich nun in einen fixen und einen variablen Kostenanteil aufspalten. Außerdem kommen neue Restriktionen hinzu [11]:

$$(10) \quad \hat{x}_{ij} \leq b_j y_i \quad \forall i, j$$

$$(11) \quad \sum_{j=1}^n \hat{x}_{ij} \leq a_i y_i \quad \text{für } i = 1 \dots m$$

$$(12) \quad \sum_{i=1}^m \hat{x}_{ij} = b_j \quad \text{für } j = 1 \dots n$$

$$(13) \quad \hat{x}_{ij} \geq 0 \quad \forall i, j$$

$$(14) \quad y_i \in \{0, 1\} \quad \text{für } i = 1 \dots m$$

Die zusätzlichen Restriktionen besagen, dass nicht mehr geliefert werden kann, als der Standort an Ressourcen zur Verfügung hat, beziehungsweise, dass nicht mehr geliefert wird als vom Kunden nachgefragt wird. Weiters wird angenommen, dass $b_j \leq a_i$ für alle i und j gilt, d.h., der Bedarf ist immer gedeckt. Wenn das nicht vorausgesetzt werden kann oder Maximalkapazitäten (kap_{ij}) für einzelne Transportverbindungen zu berücksichtigen sind, so ersetzt man b_j in (3) durch $k_{ij} := \min \{a_i, b_j, kap_{ij}\}$. So erhält man eine schärfere Formulierung des Problems. Auch die Berücksichtigung von Mindestkapazitäten für einbezogene Standorte bereitet grundsätzlich keine Schwierigkeiten. Sie werden z.B. in den Modellformulierungen von Geoffrion und McBride (1978) oder Christofides und Beasley (1983) eingeführt.

5.2. Mehrstufige FLPe mit Kapazitätsbeschränkung. In der Wirtschaft kommt man oft mit einstufigen Modellen nicht mehr aus, da mehrere Transportstufen oder Standorte für ein oder mehrere Typen von Einrichtungen gebraucht werden. Das einstufige kapazitierte Problem wird um mindestens eine Stufe erweitert, indem das Werk über zusätzliche Zwischenlager beliefert wird. Es handelt sich hierbei um ein Umladeproblem. Das Unternehmen möchte die Vertriebskosten u.a. dadurch minimieren, dass Auslieferungslager an m möglichen Standorten errichtet werden. In dieser Arbeit soll ein zweistufiges Problem beschrieben werden [11]: Es werden n Kunden, die pro Periode b_j ME nachfragen, von k Herstellern bzw. Werken (W) beliefert, die maximal a_h^W ME produzieren können. Die Kapazität eines errichteten Zwischenlagers (L) beträgt maximal a_i^L Mengeneinheiten. Die fixen Lagerhaltungskosten am Standort i sind vorgegeben. Es wird angenommen, dass sich der Lagerzugang und der Lagerabgang im Laufe einer Periode ausgleichen. Direkttransporte vom Hersteller zum Kunden sind ausgeschlossen. Weiters sei die Gesamtnachfrage gleich der Gesamtkapazität. In den Transportkosten c_{ij} können variable Kosten der Lagerhaltung am Standort i berücksichtigt werden, worauf in diesem Modell aber nicht Rücksicht genommen wird. Die Transportkosten setzen sich aus den Kosten für die Belieferung des Zwischenlagers und den Kosten für die Belieferung des Kunden aus dem Lager zusammen.

Es stellt sich nun die Frage, wie viele Lager zu errichten sind, wo sie zu betreiben und welche Transporte auszuführen sind, damit die Distributionskosten bei voller Befriedigung der Kundennachfrage minimiert werden. Auch dieses Problem lässt sich als gemischt-binäres LP formulieren. Dazu definiert man zwei reelle Variablen x_{hi} und x_{ij} für die zu transportierenden Mengen vom Hersteller ins Zwischenlager und von dort zum Kunden, sowie die Binärvariablen y_i , die bestimmt, ob ein Zwischenlager errichtet wird oder nicht. Eine mögliche Formulierung des zweistufigen FLP sieht wie folgt aus:

$$(15) \quad \min \left(\sum_{h=1}^k \sum_{i=1}^m c_{hi} x_{hi} + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} + \sum_{i=1}^m f_i y_i \right)$$

Sind die Transportkosten von der transportierten Menge abhängig, so wird die Zielfunktion dadurch nichtlinear.

Die Nebenbedingungen des zweistufigen FLP sind:

$$(16) \quad \sum_{i=1}^m x_{hi} \leq a_h^W \quad \text{für } h = 1 \dots k$$

$$(17) \quad \sum_{h=1}^k x_{hi} - \sum_{j=1}^n x_{ij} = 0 \quad \text{für } i = 1 \dots m$$

$$(18) \quad x_{ij} \leq a_i^L y_i \quad \text{für } i = 1 \dots m$$

$$(19) \quad \sum_{i=1}^m x_{ij} = b_j \quad \text{für } j = 1 \dots n$$

$$(20) \quad y_i \in \{0, 1\} \quad \text{für } i = 1 \dots m$$

Kühn und Hamburger (1963) [12] formulierten ebenfalls ein zweistufiges FLP, wobei sie zusätzlich mehrere in den Werken produzierte und von den Kunden nachgefragte Produktarten einbeziehen.

KAPITEL 4

Optimierungsmethode

Zur Lösung des kapazitierten einstufigen Standortproblems wird ein lineares Programm, das die Gesamtkosten minimieren soll, aufgestellt. Jenes Modulcenter mit den geringsten Kosten soll gebaut werden. Da nur ein Werk beliefert wird, kann die Zielfunktion so vereinfacht werden, dass man nur noch eine binäre Variable benötigt.

1. Die Implementierung mit AMPL

AMPL ist eine Programmiersprache, mit der Standortprobleme gut spezifiziert werden können.

1.1. Mengen. Für das Programm benötigt man zwei endliche Mengen, die Menge der Modulcenter und die Menge der verschiedenen Teilsorten, die von den Modulcentern angeliefert werden müssen. Drei MC an verschiedenen Standorten, die jeweils alle Teile anliefern können müssen, sollen verglichen werden. 44 verschiedene Teilsorten, die in Tabelle 4 beschrieben sind, müssen täglich zu bestimmten Zeiten angeliefert werden.

Teile- bezeich- nung	VLZ [min]	Teile/ Gebin- de	Anzahl Gebin- de	Länge [mm]	Breite [mm]	Höhe [mm]	Sequ. [min/ Teil]	VM [min/ Teil]
Radlauf- blende	345	24	7	1600	1200	1450	1	2
Stoßfänger hinten	338	6	13	2500	1100	1600	2	2
Stoßfänger vorne	338	6	13	2500	1300	2200	1	2
Dachhimmel	192	8	5	2200	1200	1500	1	20
HSK	201	8	5	2560	800	2150	2	4
I-Tafel	235	4	10	1800	1800	1600	2	0
Mittel- konsole	246	12	3	1950	800	1950	0	0
Sitze	260	1	76	1600	1200	1450	2	15
Dachzier- leiste li	167	6	7	1900	390	150	1	2
Dachzier- leiste re	167	6	7	1900	390	150	2	2
Doppel-Z Heckklap- penblende	201	5	8	1350	990	150	1	8
Frontleuch- tenkombi li	324	12	3	1800	600	1550	2	8
Frontleuch- tenkombi re	324	12	3	1800	600	1550	1	8
Frontscheibe	276	16	2	2000	1200	1500	2	10
Heckscheibe	276	55	1	2000	1200	800	1	10
Heckspoiler	283	1	38	1290	390	170	1	6
Hinterachs- federn li	299	16	2	1200	800	1450	2	4
Hinterachs- federn re	299	16	2	1200	800	1450	2	4
I-Kombi	235	8	5	800	530	180	1	12
Kühlpaket	311	12	3	1800	800	1600	2	9
Lenkrad	267	12	3	1800	800	1500	1	5
Motor Getriebe Dressup	283	1	38	1600	1200	1000	2	24
Seitenscheibe fest hinten li	276	1	38	800	600	80	1	14
Seitenscheibe fest hinten re	276	1	38	800	600	80	2	14

Teile- bezeich- nung	VLZ [min]	Teile/ Gebin- de	Anzahl Gebin- de	Länge [mm]	Breite [mm]	Höhe [mm]	Sequ. [min/ Teil]	VM [min/ Teil]
Tank	134	4	8	2400	1600	1450	1	12
Teppich (zweiteilig)	210	4	8	1680	1250	2300	2	4
Türgriffe außen hin- ten li	242	12	3	590	390	120	1	8
Türgriffe außen hin- ten re	242	12	3	590	390	120	2	8
Türgriffe außen vorne li	242	12	3	590	390	120	2	8
Türgriffe außen vorne re	242	12	3	590	390	120	1	8
Wasserfang- leiste re	279	12	3	990	590	70	2	4
Wasserfang- leisten li	279	12	3	990	590	70	2	4
Wendeplatte Gepäckraum- boden	379	24	2	1200	1000	1300	3	6
Abgasanlage	359	8	5	3700	1200	1450	4	18
Außenspiegel li	263	6	6	800	600	300	2	8
Außenspiegel re	263	6	6	800	600	300	3	8
Türver- kleidungen links hinten	270	12	3	1200	1200	2200	2	10
Türver- kleidungen links vorne	270	12	3	1200	1200	2200	1	10
Türver- kleidungen rechts hin- ten	270	12	3	1200	1200	2200	2	10
Türver- kleidungen rechts vorne	270	12	3	1200	1200	2200	1	10
Hinterachse	287	1	38	1800	925	600	2	15
Vorderachse Center	281	3	13	1800	1200	1450	0	10
Vorderachse li+re	285	6	6	2400	1400	1000	0	10

TABELLE 4. Daten der zu liefernden Teile

1.2. Parameter.

- f_i = Erschließungskosten von MC_i , $i = 1...m$
- Miete für genutzte Flächen = Gesamtfläche * Mietkosten von MC_i , $i = 1...m$
Gesamtfläche = Lager- + Sequenzier- + Vormontagefläche
- Personalkosten $_i$ = Arbeitszeit[h] * Stundenlohn $_i$, $i = 1...m$
- Anzahl der Arbeitsschichten (s) (je 8h) pro Tag
- Fahrzeit in eine Richtung [min] = $\left(\frac{L_i}{v} + \frac{A_i}{w}\right) * 60$, $i = 1...m$
- Anzahl der Fahrten je Lkw in eine Richtung mit Be- und Entladung = $\lfloor s / (Fahrzeit * 2 * Laden) \rfloor$
- Anzahl der Rundläufe zwischen MC_i und Werk:
 $RL_i = \lceil 0.5 * AnzahlFahrtenzuMC_i \rceil$, $i = 1...m$
- VLZ_j = Vorlaufzeit jeder Teilesorte j in [min], $j = 1...n$
- pay = Kosten für einen Lkw pro Tag (für alle Standorte gleich)
- stdsatz = Kosten für Lkw-Fahrer pro Stunde unabhängig vom Standort des MC
- Länge, Breite, Höhe und Stapelfaktor der Gebinde
- Länge, zulässige Breite, Höhe des Lkws
- Füllgrad des Lkws (FG in %)
- k_i = Anzahl der Lkws
= $\lceil Tagesbedarf / (Lkw - Volumen * FG * RL_i) \rceil$, $i = 1...m$
- Tagesbedarf an Teilen je Sorte
- VM_j = Zeit für die Vormontage von Teil j im MC, $j = 1...n$
- $Sequ_j$ = Zeit zum Sequenzieren von Teil j im MC, $j = 1...n$
- Band = Bandanstellung in [min]
- Puffer = Pufferzeit in [min],
eine zeitliche Sicherheitsreserve im Werk
- r_i = Risikofaktor abhängig von der Entfernung zu MC_i , $i = 1...m$

Alle Kosten werden für einen Tag berechnet, um die Modulcenter besser vergleichen zu können.

1.3. Variable. Die Variable y_i ist eine Binärvariable. Nimmt sie den Wert 1 an, so wird das Modulcenter gebaut und das Werk von diesem beliefert. Wenn $y_i = 0$ ist, wird das Modulcenter nicht errichtet. Daher kann auch nichts von dort geliefert werden.

1.4. Zielfunktion. Diese setzt sich aus den fixen Erschließungskosten und einem variablen Kostenanteil zusammen. Zu den variablen Kosten zählen die Transport-, die Flächen- und die Personalkosten. Die Transportkosten sind abhängig von der Entfernung des Modulcenters und der Anzahl der zu liefernden Teile. Zusätzlich erhöhen sie sich noch durch einen Risikofaktor, der Unfälle der Lkws miteinkalkuliert. Die Flächenkosten sind von der Sorte und Anzahl der Teile abhängig.

Je nach Sorte müssen die Teile nicht nur gelagert, sondern auch vormontiert oder auch sequenziert werden, wofür eigene Flächen benötigt werden. Die Personalkosten hängen vom Standort, von der Intensität, mit der die Teile bearbeitet werden müssen und von der Anzahl der Teile ab.

Um die Kosten besser vergleichbar zu machen, werden die Gesamtkosten für einen Tag berechnet. Da die Projektdauer auf 7 Jahre festgelegt wurde, müssen die einmaligen Erschließungskosten (f_i) zuerst für einen Tag berechnet werden.

$$\min \sum_{i=1}^m [f_i / (365 * 7) + k_i * pay + 2s * stdcost * (1 + r_i) + \text{Flächenkosten}_i + \text{Personalkosten}_i] * y_i$$

1.5. Restriktionen.

1. $[(\frac{L_i}{v} + \frac{A_i}{w}) * 60 + 2 * Laden] + Sequ_j + VM_j + Band + Puffer \leq \min(VLZ_j) \quad \forall j$
 $Sequ_j =$ Zeit zum Sequenzieren von Teil j im MC
 $VM_j =$ Zeit für die Vormontage von Teil j im MC
 $VLZ_j =$ Vorlaufzeit von Teilesorte j in [min], $j=1\dots n$

Die Bandanstellung und die Pufferzeit im Werk MSF sind fest vorgegeben. Das Bereitstellen und die Anlieferzeit eines Teiles müssen kürzer als seine Vorlaufzeit sein. Die VLZ ist für jede Teilesorte vorgegeben. Wenn die Anlieferzeit ins Werk länger ist als die VLZ, dann kann diese Teilesorte nicht von diesem MC aus geliefert werden.

2. $(\frac{L_i}{v} + \frac{A_i}{w}) * AnzahlFahrten_i \leq 9 \quad \forall i$

Die Tageslenkzeit darf maximal 9 Stunden betragen.

Die Anzahl der Fahrten eines Lkws pro Tag ist durch die Tageslenkzeit beschränkt. Wenn in zwei oder drei Schichten gearbeitet wird, kann der Lkw auch bis zu 24 Stunden im Einsatz sein.

3. Die folgende Bedingung überprüft, ob die Lager- und Bearbeitungsflächen im Modulcenter ausreichend groß sind. Diese Flächen müssen mit dem Faktor 2,25 multipliziert werden, damit zwischen den Stapeln noch genügend Platz für den An- und Abtransport der Stapel bleibt.

$$\begin{aligned}
& \sum_{j=1}^n [(Gebindefläche_j * Gebindeanzahl_j / Stapelfaktor_j)] * 2,25 + \\
& \sum_{j=1}^n [Sequenzierfläche_j + Vormontagefläche_j] * Lagerteile_j * 2,25 \\
& \leq Modulcenterfläche_i \quad \forall i \\
4. \quad & \sum_{i=1}^m y_i = 1 \quad \forall i
\end{aligned}$$

Diese Restriktion besagt, dass genau ein MC gebaut werden soll, welches das Werk MSF beliefert. Man kann diese Bedingung auch umändern und beispielsweise fordern, dass die Anzahl der zu errichtenden Modulcenter genau i , $i=1, \dots, m$, beträgt.

1.6. Solver. AMPL verfügt über verschiedene interne Solver. Zur Lösung wurde der CPLEX-Solver verwendet, mit dem sowohl lineare Programme mit dem Simplex-Verfahren oder der Inneren Punkte-Methode als auch ganzzahlige lineare Programme, mit linearer Zielfunktion, linearen Nebenbedingungen und einigen oder allen ganzzahligen Variablen mit einer Branch und Bound-Methode gelöst werden können. Bei dieser Methode wird das Ausgangsproblem in kleinere Teilprobleme unterteilt.

KAPITEL 5

Auswertung

1. Kostenvergleich der 3 Standorte

1.1. Gesamtkosten. Die Gesamtkosten wurden für eine Projektdauer von 7 Jahren kalkuliert. Die Transportkosten haben sich bei diesem Projekt als Kosten treibender Faktor herauskristallisiert. D.h., obwohl in Pesnica sowohl die Erschließungskosten als auch die Personal- und Mietkosten deutlich über jenen von den Standorten in Ungarn liegen, sind dort die Gesamtkosten schließlich trotzdem am kleinsten.

Ort	km	EK	PK	Miete	GK/Tag
Pesnica	63	$30 \cdot 10^3$	6,8	5	10314
Szentgotthard	77	$25 \cdot 10^3$	5,27	3,75	11071
Körmend	100	$20 \cdot 10^3$	4,91	3,75	13365

TABELLE 5. Vergleich der Standorte

- EK = Erschließungskosten (einmalig bei Errichtung des MCs)
- PK = Personalkosten pro Stunde (brutto)
- Miete = Miete des MCs (m^2/Monat)
- GK = Gesamtkosten pro Tag
- MC-Fläche unbeschränkt verfügbar
- Stundensatz für Lkw-Fahrer fix
- Füllgrad der Lkws (hier) = 0,9

ANMERKUNG 3. *Diese Gesamtkosten ergeben sich unter der Annahme einer täglichen Produktion von 426 Autos.*

1.2. Rundläufe. Die Lenkzeit für eine Strecke vom MC zum Werk MSF setzt sich aus der reinen Fahrzeit und der Be- und Entladezeit zusammen. Für die Be- und Entladung der Lkws werden durchschnittlich 30 Minuten berechnet. Zusätzlich kann die Rundlaufzeit bestimmt werden, welche sich aus der Hin- und Rückfahrzeit und der Be- und Entladung von Transport- und Leergut zusammen setzt. Die Be- und Entladung von Leergut dauert nur je 15 Minuten, weil die leeren Gebinde nur noch geladen werden müssen und daher eine Zusammenstell- und Wartezeit weg fällt. Die Rundlaufzeit ist wichtig, um zu wissen, wann ein Lkw wieder für eine neue Lieferung einsatzbereit ist. Je mehr Rundläufe ein Lkw pro Tag schafft, desto mehr Fahren kann er pro

Tag transportieren. Auf diese Weise spart man nicht nur Lkws, sondern auch Fahrer, die wegen der hohen Lohnnebenkosten sehr teuer sind. Die Fahrer werden je Stunde bezahlt, Lkws werden pauschal für einen Tag angemietet, unabhängig vom Füllgrad.

Ort	km	Strecke[min]	RL je Lkw
Pesnica	63	123	5
Szentgotthard	77	148	4
Körmend	100	182	3

TABELLE 6. Vergleich der möglichen Rundläufe pro Arbeitstag

- 1 Strecke zum Werk = 1*Fahrzeit + 2*Ladezeit (à 30 min)
- 1 RL = Rundlauf (2*Fahrzeit + 4*Ladezeit)
(4*Ladezeit $\hat{=}$ 2*Vollgut laden + 2*Leergut laden)
Beladung mit Vollgut: 30 min; Beladung mit Leergut: 15 min
- 1 Arbeitstag = Anzahl der Schichten (hier: 2*8h)

1.3. Füllgrad. Der Füllgrad hängt stark mit der Anzahl der RL zusammen. Je höher der Füllgrad des Lkws ist, desto weniger Anlieferungen und Lkws werden benötigt, was sich natürlich auch positiv auf die Gesamtkosten auswirkt. Bei einem Füllgrad von 0,5, das entspricht einer Auslastung von 50%, braucht man doppelt so viele Anlieferungen. Aufgrund der verschiedenen Abmessungen der Ladungsträger kann bei optimaler Beladung realistischerweise mit einer Auslastung zwischen 80% und 100% gerechnet werden. Leider liegt die Auslastung häufig darunter, da vorgegebene Zeitlimits eingehalten werden müssen. Dieses Modell wurde mit verschiedenen Füllgraden getestet, um zu sehen, wie sich die Transportkosten auf die Gesamtkosten auswirken. Beim Testen hat sich herausgestellt, dass je geringer der FG ist, desto größer ist die Kostendifferenz zwischen den Modulcentern. Dieses Resultat ist auf die Anzahl der möglichen Rundläufe je MC und somit auf die Entfernung zurückzuführen.

FG	GK ₁	L ₁	GK ₂	L ₂	GK ₃	L ₃
1,0	9590	9	10187	11	12251	14
0,9	10314	10	11071	12	13365	15
0,8	11183	11	12132	14	14702	17
0,7	12341	13	13546	16	16485	20
0,6	13934	15	15491	18	18936	24
0,5	16105	18	18143	22	23278	28

TABELLE 7. Gesamtkosten bei verschiedenen Füllgraden

- FG...durchschnittlicher Füllgrad (Auslastung des Lkws)

- GK_i ...Gesamtkosten je Tag
 $i=1$: MC in Pesnica
 $i=2$: MC in Szentgotthard
 $i=3$: MC in Körmend
- L_i ...Anzahl der Lkws je Tag für MC_i
 $L_i = \lceil \text{Tagesbedarf} / (\text{Lkwvolumen} * \text{FG} * \text{RL}_i) \rceil$
Lkwvolumen = Volumen aller zu transportierender Teile pro Tag

1.4. Vorlaufzeit. Es hat sich herausgestellt, dass einige Teile über eine sehr kurze Vorlaufzeit verfügen, sodass diese nur wenig länger als die Fahrzeit ist. Das betrifft vor allem die ungarischen Standorte.

kritische Sorten	VLZ [min]	VLZ-Puffer	VLZ-Puffer-Band	Sequ. [min/Teil]	VM [min/Teil]
Dachhimmel	192	162	142	1	20
Dachzierleiste li+re	167	137	117	1	2
Tank	134	104	84	1	12

TABELLE 8. Sorten mit kritischer VLZ

In Tabelle 8 sind alle Sorten mit kritischen VLZ aufgelistet. Keine dieser Sorten könnte zeitgerecht aus Körmend angeliefert werden, weil Fahrzeit, Pufferzeit und Bandanstellung schon 172 min ausmachen. Bei der Anlieferung des Dachhimmels aus Körmend kommt es zu Problemen, weil zu den 172 min noch 20 min für die Bandanstellung benötigt werden. Somit ist die gesamte VLZ von 192 min verbraucht, ohne dass die Teile sequenziert oder geladen worden sind. Sowohl bei der Sorte „Dachzierleiste li+re“, als auch bei der Sorte „Tank“ sind die VLZ kürzer als diese 172 min.

Die Sorte „Tank“ kann auch aus Szentgotthart nicht in der vorgegebenen Zeit angeliefert werden, weil man für Fahrzeit, Pufferzeit und Bandanstellung 138 min benötigt, hingegen nur 134 min als VLZ zur Verfügung stehen. Die anderen beiden Sorten können aus Szentgotthart geliefert werden, wobei die Sorte „Dachzierleiste li+re“, nur in sehr kleinem Umfang geliefert werden kann.

Um die drei MC trotzdem vergleichen zu können, wurden die Sorten mit kritischer VLZ nicht ins Modell miteinbezogen.

Eine Möglichkeit, das Problem der kurzen VLZ zu lösen, besteht darin, die Pufferzeit zu vernachlässigen, um so die Zeit für die Bereitstellung und Anlieferung zu verlängern. Es können dann zwar mehr

Teile angeliefert werden, aber es darf zu keinen Verzögerungen kommen, weil das sonst einen Bandstillstand zur Folge haben kann. Trotzdem würde auch diese Maßnahme nicht ausreichen, um die Anlieferung der Sorte „Tank“ aus Körmend zu ermöglichen. Alle anderen kritischen Sorten könnten auf diese Weise von allen Standorten angeliefert werden.

Ein anderer möglicher Ausweg ist, Teile mit zu kurzer Vorlaufzeit in ein anderes MC auszulagern. Hier würde sich beispielsweise das bestehende MC in Messendorf bei Graz anbieten.

Teil 2

Transportplanung

KAPITEL 6

Einleitung

In der Praxis kommen Packprobleme verschiedenster Art vor. Sie betreffen viele Bereiche des täglichen Lebens, finden aber auch in der Industrie und Wirtschaft Anwendung. Sei es das Zuschneiden von Material in der Textil- und Metallindustrie oder das Beladen großer Schiffe oder Lkws, um nur einige Beispiele zu nennen.

Sowohl Zuschnitt- als auch Packprobleme haben eine ähnliche Struktur. Beide haben zum Ziel, die Summe der ungenutzten Bereiche durch die Schnittanordnung oder die Packanordnung der Gegenständen zu minimieren. Packprobleme werden nach verschiedenen Kriterien klassifiziert, wobei die Dimension des Problems eine wesentliche Rolle spielt. Des Weiteren lassen sich Unterscheidungen in Layout-, Belade- und Verladeprobleme treffen. Ein anderer Gesichtspunkt ist die Form der Gegenstände, die entweder identisch oder heterogen sein kann. Zudem sind noch räumliche und logistische Einschränkungen zu berücksichtigen. Durch die zeitliche Verfügbarkeit der Gegenstände kommt es zusätzlich zu einer Einteilung in Online- und Offline-Verfahren.

Zur Lösung der Probleme stehen entweder deterministische oder stochastische Verfahren zur Verfügung. Eine detaillierte Klassifizierung findet sich u.a. bei Dyckhoff [13]. Das Interesse an der Forschung ist auf diesem Gebiet besonders groß, da man von der manuellen, Zeit raubenden, Planung weg zu einem automatisierten Prozess hin kommen will. Industrie und Wirtschaft erhoffen sich dadurch automatisierte Schnitt- oder Packanordnungen, dem jeweiligen Bedarf angepasst, die auch eine Zeit-, Platz- bzw. Materialersparnis gegenüber manueller Planung mit sich bringen.

Problembeschreibung II

1. Anlieferstrategien

Die Materialwirtschaft beschäftigt sich mit allen Vorgängen, die die Bereitstellung und die Entsorgung des Materials sowie die Verbesserung der Wertschöpfung innerhalb des Betriebs zum Gegenstand haben. Der regelmäßige Transport von Teilen vom MC zum Werk MSF ist von großer wirtschaftlicher Bedeutung, damit es am Band nicht zu Materialengpässen und weiterführend zu einem Stillstand kommt. Durch eine produktionssynchrone Anlieferung kann eine termingerechte Versorgung mit den notwendigen Materialien in der erforderlichen Qualität gewährleistet werden. Auch die Lagerkosten im Werk werden durch die regelmäßigen Anlieferungen reduziert, da weniger Lagerfläche benötigt wird. Außerdem tritt eine geringere Kapitalbindung im Lager auf, weil weniger Material dort gelagert werden muss.

Man unterscheidet verschiedene Strategien zur Materialbereitstellung. Die Teile können entweder einzeln beschafft werden, „Just-In-Time“ beziehungsweise „Just-In-Sequence“ geliefert werden, oder aus dem Lager geholt werden.

1.1. Einzelbeschaffung. Geringe Lager- und Kapitalbindungskosten sprechen für die Einzelbeschaffung. Dadurch steigt aber auch der Koordinationsbedarf und die Gefahr der Produktionsstockung. Zusätzlich entstehen so hohe Kosten für das Unternehmen.

1.2. Kanban. In den 50-er Jahren wurde das Kanban System bei Toyota in Japan entwickelt. Das Wort Kanban stammt aus dem Japanischen und bedeutet Schild oder Karte. Ein Kanban enthält Informationen über den qualitativen und quantitativen Inhalt eines Behälters. Er dient als Auftragspezifikation. Damit soll erreicht werden, dass es erst dann zur Produktion in einer Produktionsstufe kommt, wenn eine übergeordnete Produktionsstufe Bedarf angemeldet hat und entsprechende Zwischenlager erschöpft sind. Durch das Kanban-Prinzip kommt es zu einer Lagerbestands- und Kapitalkostenreduktion sowie zu einer Einsparung von Lagerfläche durch Fertigung und Montage bei konkretem Bedarf. Sie ist eines der wichtigsten Instrumente bei der Realisierung der JIT-Produktion. Die Materialbereitstellung wird innerbetrieblich durch das Kanban-System und überbetrieblich z.B. durch die JIT (Just-In-Time) oder die JIS (Just-In-Sequence)-Anlieferung optimiert.

1.3. JIT. Mit Hilfe des „Just-In-Time“ Verfahrens , kurz JIT, erreicht man eine Produktion auf Abruf, die eine spätest mögliche Bereitstellung von qualitativ einwandfreien Produktionsfaktoren und Produkten gewährleistet. Auf diese Weise können Durchlaufzeiten und Lagerbestände im Interesse einer kundenorientierten Leistungserstellung reduziert werden. Die Materialbereitstellung wird innerbetrieblich durch das Kanban-System und überbetrieblich z.B. durch die JIT- oder JIS-Anlieferung optimiert [14]. Trotzdem muss die Produktion so mit Teilen versorgt werden, dass immer ein Sicherheitsbestand im Werk vorhanden ist, falls eine Anlieferung zu spät eintrifft, kurzfristig auf Kundenwünsche eingegangen werden muss oder z.B. Teile defekt sind. Ein Nachteil dieser Methode ist die große Abhängigkeit vom Lieferanten.

1.4. JIS. Just-In-Sequence (JIS) ist ein Konzept aus der Beschaffungslogistik. Es ist eine Weiterentwicklung der JIT Produktion. Bei der Bereitstellung nach dem JIS-Verfahren sorgt der Zulieferer dafür, dass die benötigten Module rechtzeitig in der notwendigen Menge angeliefert werden, ohne sie im Werk lagern zu müssen, und dass die Reihenfolge der benötigten Module stimmt. JIS wird vor allem in der Automobilindustrie eingesetzt. Die Vorlaufzeit beträgt je nach Produktionssystem einige Minuten bis mehrere Tage. Abhängig von der Vorlaufzeit ist demnach die zulässige Entfernung zwischen Lieferant und Kunden.

Als Beispiel für eine JIS-Anlieferung kann die Endmontage von Automobilen betrachtet werden. Durch das Aufsetzen der lackierten Karosserien auf das Endmontageband ist die Reihenfolge der Fahrzeuge festgelegt. Werden zum Beispiel die Außenspiegel per JIS-Anlieferung bereitgestellt, sind diese bereits so nach Farben sortiert, wie die Fahrzeuge auf dem Montageband. Diese Belieferungsform eignet sich besonders für variantenreiche Zulieferumfänge, wie Stoßfänger, Hauptkabelsätze oder Türverkleidungen, denn das Lagern aller Varianten würde hohe Kosten verursachen [15].

1.5. Lagerhaltung. Die Vorratshaltung gewährleistet einen kontinuierlichen Produktionsprozess. Beschaffungsrisiken können minimiert und Preisvorteile ausgenutzt werden. Diesen Vorteilen stehen hohe Lagerhaltungskosten und begrenzte Lagerkapazitäten gegenüber. Daher werden vor allem weniger variantenreiche Komponenten auf Lager gehalten.

2. Beladung der Lkws

Es wird nicht nur gefordert, dass die Teile rechtzeitig und regelmäßig angeliefert werden, sondern gleichzeitig sollen auch die Transportkosten minimiert werden. Mit jedem zusätzlichen Lkw sind Mehrkosten in Form von Personal- und Mietkosten verbunden. Durch eine

optimale Beladung der Lkws lässt sich eine maximale Nutzung der Ladematrix realisieren. Diese Aufgabe entspricht dem mathematischen Problem des Bin Packings, einem NP-schweren Problem, welches mit Hilfe von verschiedenen Heuristiken gelöst werden kann. Im zweiten Teil dieser Arbeit soll eine Lösung gefunden werden, wie bestimmte Teile auf möglichst wenige Fahrzeuge geladen werden können.

Im Laufe dieser Diplomarbeit haben sich zwei unterschiedliche Anforderungen an das Modell herauskristallisiert. Zum einen soll ein Lkw bei gegebener Tagesproduktionsmenge optimal beladen werden, sodass das Ladevolumen maximal ausgenutzt wird und eine regelmäßige Anlieferung der Teile, die durch die Vorlaufzeit bestimmt ist, gewährleistet wird. Zum anderen besteht eine weitere Einschränkung in der Aufgabe, bestimmte Sorten von Teilen an vorgesehene Docks liefern zu müssen. Mit anderen Worten, es ist nicht erlaubt, Teile für verschiedene Docks auf einen Lkw zu laden.

Von der Abteilung für Logistik wurde dann der Wunsch geäußert, dass es sinnvoll sei, Lkws so zu beladen, dass gewisse Teile in einem bestimmten Verhältnis zueinander geliefert werden können. Wenn z.B. ein Dach geliefert wird, sollen gleichzeitig auch vier passende Türen geliefert werden. Die Lkws müssen also so beladen werden, dass immer ganze Autos damit gefertigt werden können. Durch diese Maßnahme sollen möglichst wenige Teile im Werk gelagert werden müssen.

KAPITEL 8

Modell

1. Einführung

Vom Werk MSF werden Signale ins MC geschickt, um gewisse Teile fertig- bzw. bereitzustellen, damit sie in einen Lkw geladen werden können. Die Teile werden in sortenreinen Gebinden zusammengefasst. Wenn die Gebinde stapelbar sind, setzt man sie wiederum zu sortenreinen Stapeln zusammen, um Platz zu sparen. Ein Gebinde ist stapelbar, falls ein Vielfaches der Höhe des Gebindes kleiner als die Höhe des Lkws ist, sonst entspricht ein Gebinde einem Stapel. Von diesem quaderförmigen Stapel sind alle Abmessungen bekannt. Die Länge ist per Definition größer oder gleich der Breite, die Höhe ist durch die Höhe des Lkws (3m) beschränkt. Durch die Stapelbildung wird automatisch eine Optimierung in der Höhe erreicht. D.h., es genügt in Folge das *2-dimensionale Bin Packing-Problem* zu betrachten.

Die Lkws sind in diesem Modell alle von einheitlicher Größe. Die Kapazität der Fahrzeuge bildet eine wichtige Restriktion. Ziel ist es, eine Lösung mit so wenig beladenen Fahrzeugen wie möglich zu finden. Die Anzahl der sich im Einsatz befindenden Fahrzeuge und vor allem deren Fahrer stellen einen wichtigen Kostenfaktor dar, den man auf diese Weise minimieren kann. Bin Packing-Probleme mit Behältern verschiedener Größe werden in der Literatur als „variable sized bin packing problems“ bezeichnet. Sie werden in dieser Diplomarbeit aber nicht näher betrachtet.

In der Literatur finden sich hauptsächlich approximative Algorithmen für das Bin Packing-Problem. Einen Überblick geben z.B. Martello und Toth, 1981 [16] oder Csirik und Woeginger, 1996 [17].

Insbesondere werden zwei Restriktionen in die Problemstellung miteinbezogen, die Orientierungs- und die Guillotineschnitt-Restriktion. Erstere fordert, wie in Abbildung 3 zu sehen ist, dass nur 90° -Drehungen der Objekte erlaubt sind. Die Objekte müssen parallel zu den Seiten des Bins geladen werden. Die andere besagt, dass alle platzierten Objekte durch eine Serie von Guillotineschnitten reproduzierbar sind. Ein solcher Schnitt zerlegt einen Behälter in zwei kleinere Behälter, wobei die Schnittfläche parallel zu einer Seitenfläche des durchgeschnittenen Behälters liegt [25]. In Abbildung 4 sieht man eine Sendung bestehend aus mehreren „walls“, die aneinander gereiht nicht in ein Bin passen. Daher werden die „walls“ so in zwei Teile (Führen) zerlegt, dass die

Führen schließlich in den Bins Platz haben. Die Sendung könnte theoretisch nach jeder Wand „durchgeschnitten“ werden.

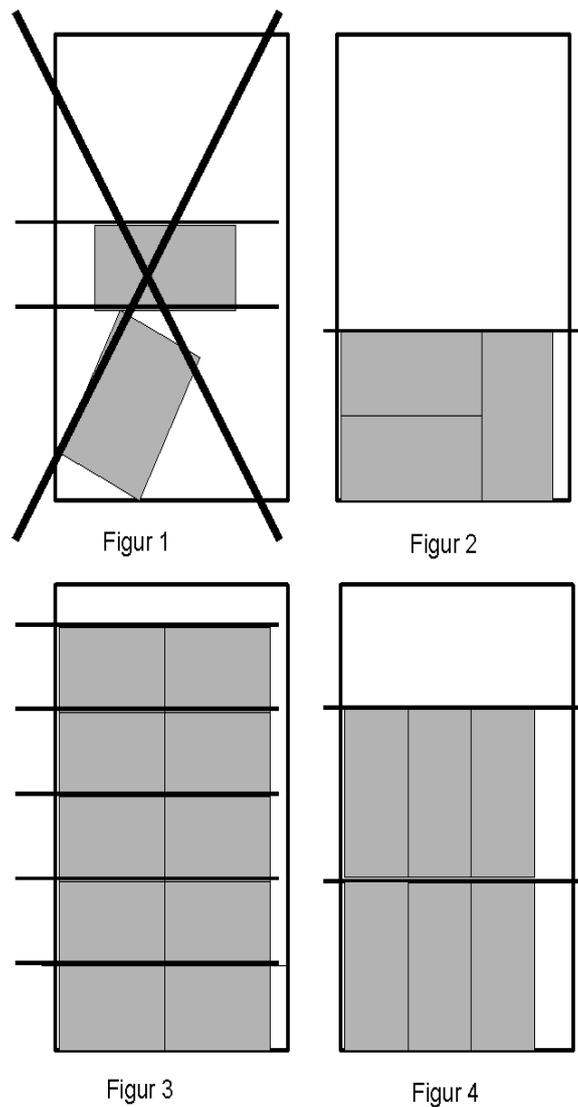


ABBILDUNG 3. Beladung eines Bins

ANMERKUNG 4. In *Figur 1* ist keine korrekte Beladung des Bins abgebildet, da die Objekte nicht parallel zu den Seitenwänden angeordnet sind. *Figur 2* zeigt die Beladung mit einer gemischten „wall“. In *Figur 3* sind fünf horizontale „walls“ und in *Figur 4* sind zwei vertikale „walls“ dargestellt.

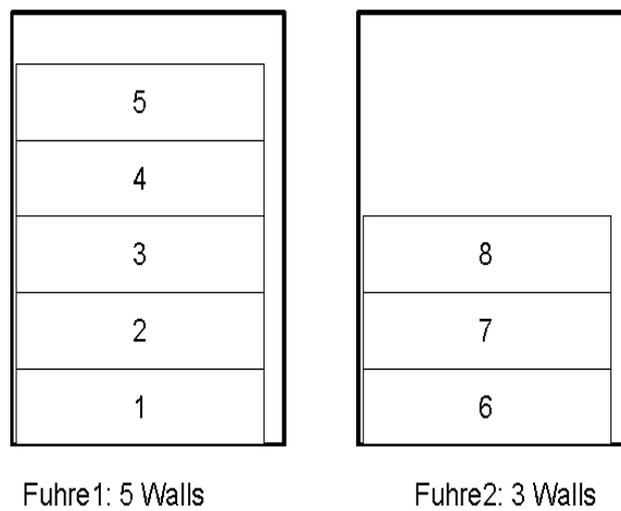
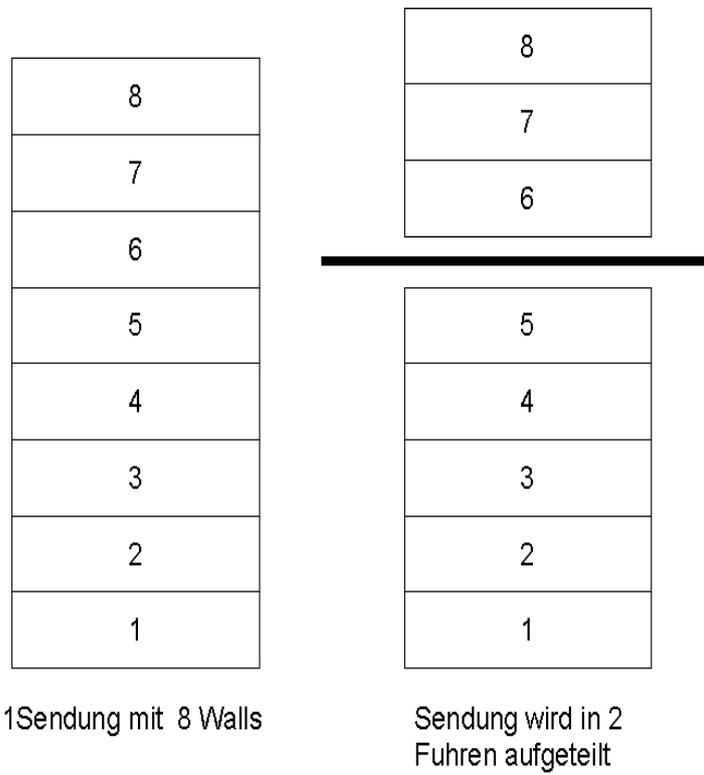


ABBILDUNG 4. Guillotineschnitt

2. Definition des BP-Problems

Angenommen man hat n Teile, jedes in einer gegebenen Größe, und ausreichend viele Behälter (Bins) gleicher Kapazität. Alle Teile sollen den Bins so zugeordnet werden, dass möglichst wenige Bins verwendet werden, wobei die Kapazität der Bins nicht überschritten werden darf. O.B.d.A. kann die Kapazität der Bins auf eins gesetzt werden. Die Teile in den Bins dürfen sich nicht überlappen. Dieses Zuordnungsproblem kann dann wie folgt formuliert werden [9]:

Bin-Packing Problem: Gegeben ist eine Liste von Teilen mit nicht negativem Gewicht : $a_1, \dots, a_n \leq 1$
 Gesucht wird eine natürliche Zahl k und eine Funktion $f: \{1 \dots n\} \rightarrow \{1 \dots k\}$ mit

$$(21) \quad \sum_{i:f(i)=j} a_i \leq 1 \quad \forall j \in \{1 \dots k\},$$

so dass k ein Minimum ist.

Für die Implementierung eignet sich folgende mathematische Formulierung, wobei w_j das Gewicht des j -ten Teils bezeichnet und C die Kapazität der Behälter. Die Gewichte w_j und die Kapazität der Behälter seien positive ganze Zahlen:

$$\min \sum_{i=1}^n y_i$$

unter

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^n w_j x_{ij} &\leq C y_i, & i = 1, \dots, m \\ \sum_{i=1}^m x_{ij} &= 1, & j = 1, \dots, n \\ x_{ij}, y_i &\in \{0, 1\} & i = 1, \dots, m \quad j = 1, \dots, n \end{aligned}$$

wobei

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{falls Teil } j \text{ in Behälter } i \text{ kommt} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$$

$$y_i = \begin{cases} 1, & \text{falls Behälter } i \text{ benützt wird} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$$

3. 2-dimensionales Bin Packing

Beim endlichen 2-dimensionalen Bin Packing sind i rechteckige Objekte, $i = 1 \dots m$, mit vorgegebener Länge ℓ_i und Breite b_i und beliebig viele gleich große rechteckige Objekte mit Länge L und Breite B , auch Bins genannt, gegeben. Das Problem besteht darin, die Objekte den

Bins ohne Überlappung und mit den Seiten parallel zu den Seiten der Bins so zuzuordnen, dass die Anzahl der verwendeten Bins minimal ist [26]. O.B.d.A. sei $b_i \leq \ell_i$, $b_i \leq B$ und $\ell_i \leq L$ und alle Eingabedaten seien positive ganze Zahlen.

Dieses Problem hat viele Anwendungen in der Industrie, sowohl z.B. beim Schneiden von Holz und Glas oder beim Beladen von Transportbehältern oder bei der Lagerung von Gegenständen. Die meisten Algorithmen in der Literatur zur Lösung von „2-dimensionalen BPP“ sind Greedy-Algorithmen, die man wieder in 2 Familien einteilen kann. Man unterscheidet Einphasen- und Zweiphasen-Algorithmen. Erstere packen die Objekte direkt in die Bins, während letztere die Objekte zuerst in ein einziges beliebig langes Bin packen und dann in der zweiten Phase die Lösung auf gleich große auch in der Länge beschränkte Bins aufteilen.

In dieser Diplomarbeit werden ausschließlich Gegenstände betrachtet, die um 90° rotieren dürfen und parallel zu den Seiten der Bins angeordnet sind. In der Folge werden unterschiedliche Packstrategien näher betrachtet werden.

Lösungsverfahren

Das Bin Packing Problem, eine Menge von unterschiedlich großen Objekten in möglichst wenige gleich große Behälter zu laden, kann mittels verschiedener Algorithmen gelöst werden. Im Folgenden werden verschiedene Ansätze sowohl für Online- als auch für Offline-Verfahren betrachtet werden. Die Reihenfolge der Gegenstände kann das Ergebnis beeinflussen. Diese Tatsache nutzt man bei den Offline-Verfahren aus, indem man die Gegenstände der Größe nach ordnet, wodurch sich eine verbesserte Laufzeit ergibt.

1. Gütegarantie von Approximationsalgorithmen[27]

DEFINITION 3. Ein Optimierungsproblem Π ist durch ein 4-Tupel charakterisiert:

1. Eine Menge Π von Probleminstanzen
2. Zu jeder Instanz $I \in \Pi$ gehört eine Menge zulässiger Lösungen $Lsg(I)$
3. Jede Lösung $y \in Lsg(I)$ hat einen (nicht negativen, rationalen) Wert $v(I, y)$
4. *min* oder *max*

DEFINITION 4. A ist ein Approximationsalgorithmus, wenn A für jede Instanz I eine zulässige Lösung liefert.

DEFINITION 5. Sei $\alpha \geq 1$. Ein α -Approximationsalgorithmus für ein Minimierungsproblem Π berechnet zu jeder Instanz $I \in \Pi$ eine zulässige Lösung mit Wert $A(I) \leq \alpha * OPT(I)$ und hat eine Laufzeit polynomial in der Eingabeengröße $|I|$, d.h., A hat (für Minimierungsprobleme) eine relative Gütegarantie α .

ANMERKUNG 5. α wird Approximationsfaktor, -güte bzw. -garantie genannt.

2. Online-Verfahren für das 1-dimensionale BP-Problem

Zunächst sollen Strategien für das 1-dimensionale BP-Problem betrachtet werden. D.h., n Objekte mit einem Gewicht (einer Länge) zwischen 0 und 1 sollen in die kleinstmögliche Anzahl von Bins mit der Kapazität 1 „gepackt“ werden. Die Gewichte der einzelnen Objekte sind zum Startzeitpunkt des Verfahrens nicht bekannt. Die folgenden

Verfahren können auch für das 2-dimensionale BP weiterverwendet werden.

2.1. Next Fit-Algorithmus. Die Idee des Next Fit-Algorithmus ist, die Teile der Reihe nach in n Bins (C_i , $i = 1 \dots n$) zu packen. Der erste Teil, der nicht mehr in das aktuelle C_i passt, wird in das nächste C_{i+1} geladen. Das alte C_i wird geschlossen.

Der NF-Algorithmus ist ein Faktor 2 Approximationsalgorithmus. Um das zu beweisen benötigt man den folgenden Satz, wobei $NF(I)$ die minimale Anzahl an Bins sei, die der NF-Algorithmus für die Inputfolge I benötigt.

SATZ 1. [9] *Die Laufzeit des NF-Algorithmus ist $O(n)$. Für jede Inputfolge $I = a_1 \dots a_n$ gilt folgende Abschätzung:*

$$(22) \quad NF(I) \leq 2 \lceil SUM(I) \rceil - 1 \leq 2OPT(I) - 1$$

BEWEIS. Sei $k := NF(I)$ und f die Zuordnung der Teile zu den Bins des NF-Algorithmus. Für $j=1, \dots, \lfloor \frac{k}{2} \rfloor$ gilt:

$$\sum_{i: f_i \in [2j-1, 2j]} a_i > 1.$$

Durch die Addition dieser Ungleichungen erhält man diese Abschätzung, wobei $SUM(I)$ die Summe der Gewichte aller Teile darstellt:

$$\left\lfloor \frac{k}{2} \right\rfloor < SUM(I) = \sum_{i=1}^n a_i.$$

Da $\lfloor \frac{k}{2} \rfloor$ ganzzahlig ist, folgt

$$\frac{k-1}{2} \leq \left\lfloor \frac{k}{2} \right\rfloor \leq \lceil SUM(I) \rceil - 1.$$

Nach einfachen Umformungen kann gezeigt werden:

$$k \leq 2 \lceil SUM(I) \rceil - 1$$

Die zweite Ungleichung, $\lceil SUM(I) \rceil \leq OPT(I)$, ist offensichtlich eine untere Schranke. $OPT(I)$ ist die Optimallösung der Instanz I unter Berücksichtigung der Aufteilung der Teile auf Bins. \square

BEISPIEL 1. *Der NF-Algorithmus soll mit 7 Objekten verschiedenen Gewichts veranschaulicht werden:*

$$\begin{aligned} \text{Gewicht der Teile: } & 0,2; 0,5; 0,4; 0,7; 0,1; 0,3; 0,8; \\ \text{Summe der Gewichte} & = 3 \\ \text{Einheitsgröße der Bins: } & 1 \end{aligned}$$

Die Objekte werden in der angegebenen Reihenfolge geladen. Sobald das nächste Objekte nicht mehr in das aktuelle Bin passt, wird dieses Bin geschlossen und ein neues Bin muss geöffnet werden.

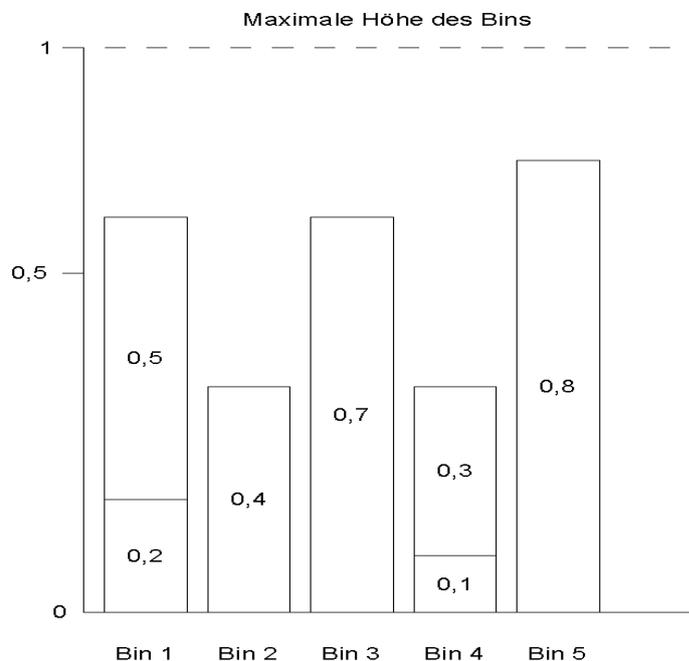


ABBILDUNG 5. Next Fit Algorithmus auf ein Online-Problem angewandt

In Abbildung 5 wird gezeigt, dass bei dieser Reihenfolge der Eingabe 5 Bins benötigt werden.

Laut Satz 8 gilt: $NF(I) = 5 \leq 2\lceil 3 \rceil - 1 = 5$

Der Nachteil des NF-Algorithmus ist, dass man die Gegenstände nur ins aktuelle Bin packen kann. Wenn ein Bin einmal geschlossen ist, gibt es keine Möglichkeit mehr, es wieder zu öffnen und weiter zu bepacken, obwohl es möglicherweise nicht optimal geladen ist. Der Algorithmus ist gut zur Lösung von Online - Problemen geeignet, da bei diesen keine Umordnung der Objekte erfolgen kann. Der Algorithmus liefert umso bessere Ergebnisse, je kleiner die Gegenstände sind.

2.2. First Fit-Algorithmus. Der First Fit-Algorithmus für Online-Probleme basiert auf der Idee, das nächste Objekt ins erste Bin zu packen, in das es noch hineinpasst, wenn es ein solches gibt, sonst in ein neues. Er hat gegenüber dem NF-Algorithmus den Vorteil, dass ein Bin nur geschlossen wird, wenn es ganz voll ist oder alle Gegenstände schon zugewiesen sind. Der FF-Algorithmus kann besser als der NF-Algorithmus sein, ist aber trotzdem auch ein Faktor 2 Approximationsalgorithmus.

Algorithm 1 First Fit

Setze $f(i) := \min \left\{ j \in \mathbb{N} : \sum_{h < i: f(h)=j} a_h + a_i \leq 1 \right\}$
 Setze $k := \max f(i) \quad i \in (1 \dots n)$

Dasselbe Beispiel mit FF-Algorithmus gelöst zeigt, dass er effizienter als der NF-Algorithmus sein kann:

Größe der Teile: 0,2; 0,5; 0,4; 0,7; 0,1; 0,3; 0,8

Einheitsgröße der Bins: 1

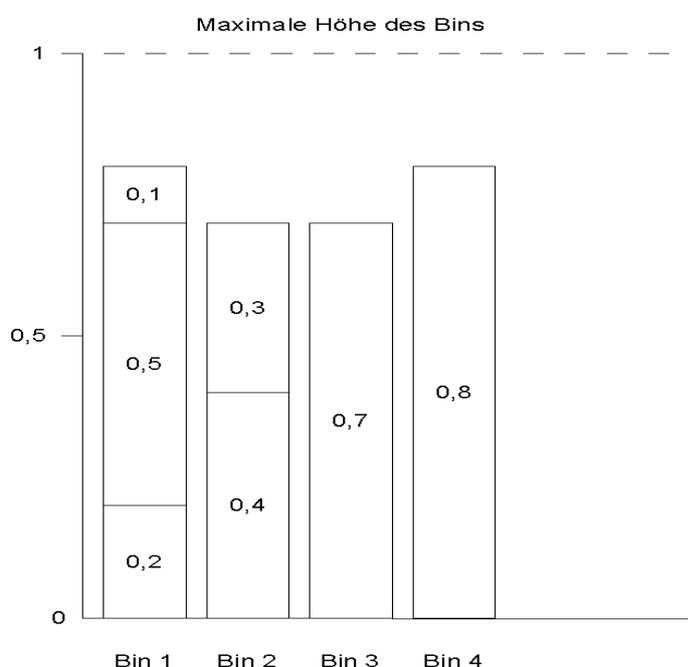


ABBILDUNG 6. First Fit Algorithmus auf ein Online-Problem angewandt

In diesem Beispiel kann durch den FF-Algorithmus im Vergleich zum NF-Algorithmus, wie in Figur 6 zu sehen ist, ein Bin eingespart werden.

SATZ 2. *Johnson et al.[1974], Garey et al.[1976].*
 Für alle Instanzen I des Bin-Packing-Problems gilt:

$$FF(I) \leq \left\lceil \frac{17}{10} OPT(I) \right\rceil.$$

Auch der FF-Algorithmus verhält sich besser, wenn die Gegenstände klein sind. Seine Laufzeit beträgt $O(n^2)$.

2.3. Best-Fit. Der Best-Fit-Algorithmus basiert auf der Idee des FF-Algorithmus mit dem Unterschied, dass die Gegenstände nicht in das erste passende Bin gepackt werden, sondern in jenes, das die kleinste Restkapazität aufweist. Johnson et al. haben gezeigt, dass BF denselben Schranken wie FF genügt. Beide Algorithmen haben dieselbe Laufzeit [18].

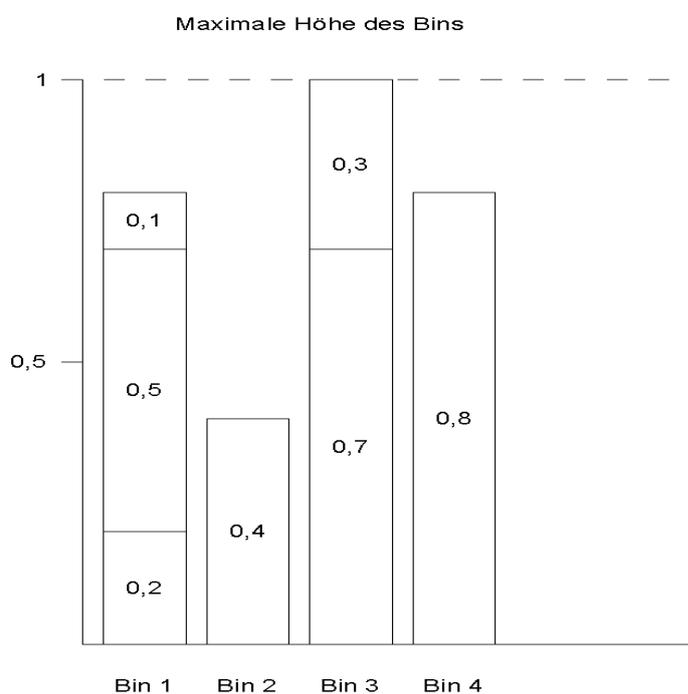


ABBILDUNG 7. Best Fit Algorithmus auf ein Online-Problem angewandt

3. Offline-Verfahren für das 1-dimensionale BP-Problem

Der Unterschied zu den Online-Verfahren liegt darin, dass die Gewichte aller Objekte schon vor dem Start bekannt sind. Daher liegt es nahe, zuerst die Objekte in absteigender Reihenfolge zu sortieren. Die Methode eines Online-Verfahrens wird übernommen und zusätzlich durch die Sortierung der Objekte ergänzt, um dann eine Lösung zu generieren, die noch näher am Optimalwert liegt. Daraus ergeben sich drei neue Verfahren, das Next Fit Decreasing (NFD), das First

Fit Decreasing (FFD) und das Best Fit Decreasing (BFD). Alle drei Verfahren haben eine Laufzeit von $O(n \log n)$.

SATZ 3. *Simchi-Levi[1994] Der FFD-Algorithmus ist ein $\frac{3}{2}$ -Faktor Approximations-Algorithmus für das BP-Problem.*

BEWEIS. Sei I eine Instanz und $k := \text{FFD}(I)$, die benötigte Anzahl der Bins bei Anwendung des FFD-Algorithmus. Betrachte das j -te Bin für $j = \lceil \frac{2}{3} k \rceil$. Zwei Fälle sind in diesem Beweis zu unterscheiden:

Falls das j -te Bin ein Objekt mit Gewicht $> \frac{1}{2}$ enthält, dann hatte kein Bin mit kleinerem Index Platz für dieses Objekt, denn sonst wäre es aufgrund des FFD-Algorithmus schon vorher zugewiesen worden. Da die Objekte in absteigender Reihenfolge bearbeitet werden, gibt es zumindest j Objekte mit einem Gewicht $> \frac{1}{2}$. Daher gilt: $\text{OPT}(I) \geq j \geq \frac{2}{3}k$.

Andernfalls enthält das j -te Bin, und somit auch jedes Bin mit höherem Index, d.h., $j, j+1, \dots, k$, kein Objekt mit Gewicht $\geq \frac{1}{2}$. Dann enthalten die restlichen Bins mindestens $2(k-j)+1$ Objekte, von denen keines in ein Bin mit Index $1, \dots, j-1$ passt. Daher gilt folgende Abschätzung:

$$\text{SUM}(I) > \min(j-1, 2(k-j)+1) \geq$$

$$\min(\lceil \frac{2}{3} \rceil k - 1, 2(k - (\frac{2}{3}k) + \frac{2}{3}) + 1) =$$

$$\lceil \frac{2}{3} \rceil k - 1 \text{ und}$$

$$\text{OPT}(I) \geq \text{SUM}(I) \succ \frac{2}{3}k - 1.$$

$$\text{Damit ist } \text{OPT}(I) \geq \lceil \frac{2}{3} \rceil k.$$

□

Man kann zeigen, dass die asymptotische Performance-Garantie sogar noch besser ist: Baker gab 1985 einen einfachen Beweis, der zeigt, dass $\text{FFD}(I) \leq \frac{11}{9} \text{OPT}(I) + 3$ [19]. Eine noch schärfere Abschätzung ist bei Yue [20] zu finden. Er beweist, dass für alle Instanzen I gilt: $\text{FFD}(I) \leq \frac{11}{9} \text{OPT}(I) + 1$.

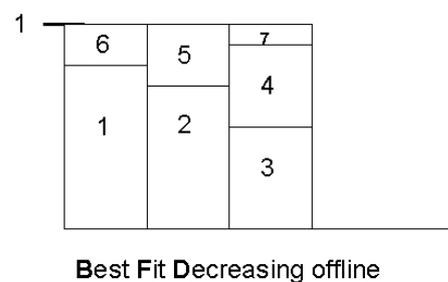
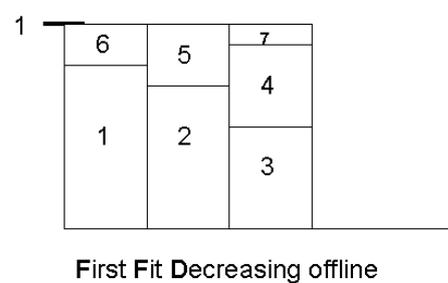
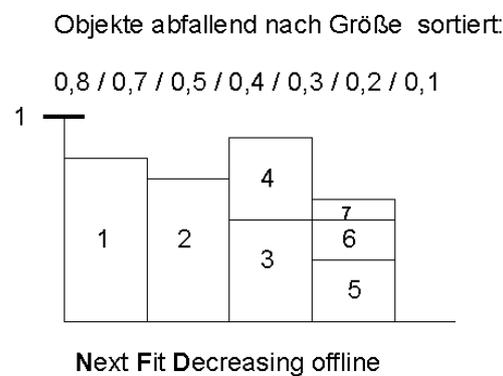


ABBILDUNG 8. Vergleich eindimensionaler Offline-Algorithmen

In Abbildung 8 kann man deutlich sehen, dass der NFD-Algorithmus sowohl mehr Bins als der FFD- als auch der BFD-Algorithmus benötigt.

4. Offline-Verfahren für das 2-dimensionale BP-Problem

4.1. Einphasen-Algorithmen. Die Gegenstände werden in so genannte Level gepackt. Die Idee eines Levels ist, dass die Breite des Bins

maximal ausgenutzt wird. Ein Level wird geschlossen, wenn kein Gegenstand mehr der Breite nach in das Level passt. Ein Level schließt horizontal mit der Höhe des längsten Gegenstandes, der darin vorkommt, ab. Man spricht von einem normierten Level, wenn die Gegenstände zusätzlich der Länge nach sortiert sind. In der Literatur wird auch von Höhe anstatt von Länge gesprochen.

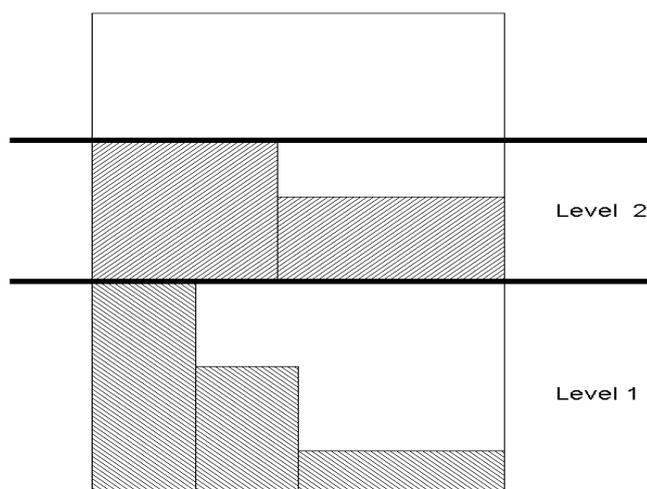


ABBILDUNG 9. Normierte Level

Bei Offline-Verfahren können die Gegenstände wieder der Länge nach geordnet werden. Es ergeben sich wieder drei Verfahren, analog dem eindimensionalen BP, das Next Fit Decreasing Height (NFDH), das First Fit Decreasing (FFDH) Height und das Best Fit Decreasing Height (BFDH). Garantien für die Güte dieses Verfahrens findet man u.a. bei Coffman et al.(1980) [21]. Es gelten folgende Abschätzungen für jede Instanz I :

$$NFDH(I) \leq 2OPT(I) + 1$$

$$FFDH(I) \leq \frac{17}{10}OPT(I) + 1$$

Beide Algorithmen können so implementiert werden, dass sie eine Laufzeit von $O(n \log n)$ benötigen (siehe Johnson [22]).

7 rechteckige Objekte, die der Größe nach geordnet sind, sollen zum Vergleich mit dem NFDH-, FFDH- und dem BFDH-Algorithmus in ein Bin gepackt werden. In Figur 10 ist dieses Beispiel zum Vergleich der drei Algorithmen dargestellt. Man sieht, dass der BFDH-Algorithmus nur 2 Levels benötigt. Die beiden anderen Algorithmen hingegen brauchen ein zusätzliches Level. Der NFDH-Algorithmus kann die Fläche in einem Level am schlechtesten ausnutzen, weil ein Level geschlossen wird, sobald ein neues geöffnet wird.

4.2. Zweiphasen-Algorithmen. Eine Kombination dieser Methoden bringt eine weitere Verbesserung für endliche 2-dimensionale BP-Probleme. Der Hybrid First Fit-Algorithmus (HFF) verwendet in der ersten Phase den FFDH und wendet dann auf das vorläufige Ergebnis den FFD für eindimensionales BP an. Für den HFF gilt [23]:

$$\frac{91}{45} (OPT(I) - 1) \leq HFF(I) \leq \frac{17}{8} OPT(I) + 5$$

In der ersten Phase werden alle Gegenstände in ein einziges Bin unendlicher Länge gepackt. In der zweiten Phase werden die Level neu auf mehrere Bins mit fester Länge verteilt. Beide Phasen können so implementiert werden, dass sich eine Laufzeit von $O(n \log n)$ ergibt.

Bei Berkey und Wang [24] findet sich ein anderer 2-Phasen-Algorithmus, der Finite Best Strip Algorithmus (FBS), der eine BFD-Heuristik in der zweiten Phase verwendet. Die Idee des FBS-Algorithmus in der ersten Phase ist, wenn ein Gegenstand nicht in das aktuelle Level passt, dann öffnet man ein neues. Sonst wird der Gegenstand in jenes Level gepackt, in dem der verbleibende horizontale Abstand minimiert wird. In der zweiten Phase werden die Level in Bins mit Hilfe des BFD-Verfahrens gepackt. Dieser Algorithmus hat eine Laufzeit von $O(n \log n)$.

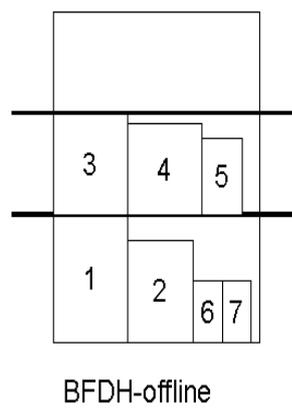
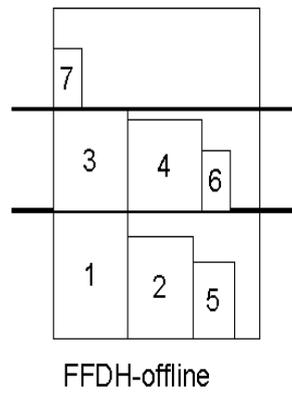
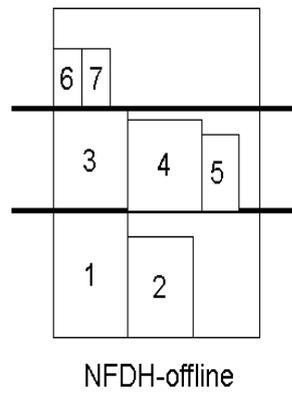
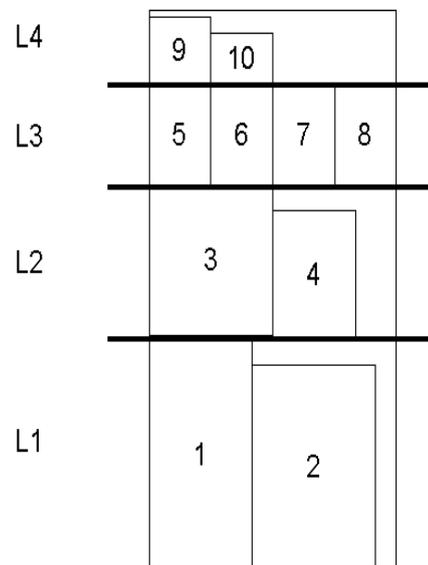
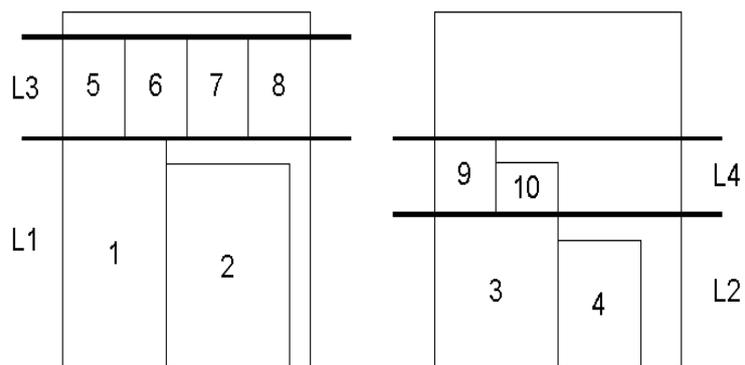


ABBILDUNG 10. 2-dimensionale Bin Packing-Strategien



Phase 1: Levels in beliebig langem Bin



Phase 2: Levels auf kleinere identische Bins aufgeteilt

ABBILDUNG 11. 2-Phasen Algorithmus

KAPITEL 10

Implementierung

1. Problembeschreibung

Der Tagesbedarf an verschiedenen Teilen, der im Vorhinein bekannt ist, soll mit möglichst wenigen Lkws vom Zwischenlager zum Werk MSF angeliefert werden. Zusätzlich muss jeder Teil innerhalb eines bestimmten Zeitfensters angeliefert werden. Eine weitere Einschränkung besteht darin, dass jeder Teil an ein bestimmtes Dock geliefert werden muss. Durch die produktionssynchrone Anlieferung und die optimale Beladung der Lkws, die auch impliziert, dass jeder Teil ans richtige Dock geliefert wird, damit man innerhalb des Werks möglichst wenig Aufwand hat, sollen Transport- und Lagerkosten gespart werden. Außerdem soll die Zusammenstellung der Ladematrix durch dieses Programm automatisiert werden, wodurch Zeit und Personalkosten gespart werden.

Jede Sorte hat eine andere vorgegebene Vorlaufzeit. Unter Vorlaufzeit soll die Zeit zwischen dem Senden des Signals von MSF an das MC und der Entladung vom Lkw am Dock verstanden werden.

*ANMERKUNG 6. (Vorlaufzeit = vorbereitende Tätigkeiten + Anzahl Takte Vormontage * Taktzeit + Beladung des Lkws + Fahrzeit zum Werk + Entladung des Lkws + Bandbewirtschaftung + Zeitpuffer)*

Die Tagesmenge der Teile jeder Sorte wird entsprechend der Vorlaufzeit in Sendungen aufgeteilt. Teilt man die Einsatzzeit des Lkws pro Tag (1080 min) durch die Vorlaufzeit so ergibt sich die optimale Frequenz, mit der die Teile einer Sorte angeliefert werden müssen, damit es weder zu einem Stillstand am Band noch zu überflüssig langer Lagerung der Teile im Werk kommt.

Die Teile einer sortenreinen Sendung werden zu Gebinden zusammengefasst und diese wiederum zu Stapeln, falls es möglich ist. (Gebinde können nur gestapelt werden, wenn ein Vielfaches der Höhe des Gebindes in den Lkw passt und das Gebinde gestapelt werden darf.) Da die Stapelhöhe durch die Lkw-Höhe beschränkt ist, kann das Problem mit Hilfe einer zwei-dimensionalen BP-Strategie gelöst werden.

Die Ladematrix der Lkws wird mit dem First-Fit-Decreasing-Height-Algorithmus berechnet. Wenn mehrere Sorten unterschiedlicher Größe

an ein Dock geliefert werden müssen, ist jene Sorte mit der kürzesten VLZ zuerst zu laden. Haben zwei Sorten die gleiche VLZ, so wird jene Sorte mit der größeren Gebindefläche zuerst geladen. Der Startzeitpunkt jedes Lkws ist durch die kürzeste Vorlaufzeit der Teile, die geladen werden, bestimmt. Jeder Lkw darf nur innerhalb der von der Sorte abhängigen VLZ beladen werden. Auch wenn er räumlich nicht optimal beladen ist, muss er zum Werk liefern. Nach einem ganzen Rundlauf können Lkws natürlich wieder beladen werden, sofern sich eine Belieferung des Werks an diesem Arbeitstag noch ausgeht. Je mehr Rundläufe ein Lkw pro Arbeitstag schafft, desto mehr Fahren kann er transportieren und desto weniger zusätzliche Lkws werden benötigt, was wiederum Kosten spart.

Bei einem 2-Schicht-Betrieb ist der Lkw zwei mal 9 Stunden pro Tag im Einsatz, wobei der Fahrer nach 9 Stunden gewechselt wird. Die Fahrzeit ist von der Entfernung und den Geschwindigkeitsbeschränkungen auf den Straßen abhängig. Eine kürzere Fahrzeit ermöglicht mehr Rundläufe. Da die Gebinde wieder verwendet werden können, müssen sie regelmäßig wieder zum MC zurückgeführt werden. Man unterscheidet Gebinde, die klappbar sind, und solche die nur in voller Größe zurückgebracht werden können. Klappbare Gebinde können gestapelt werden, wodurch sich das Volumen des Leergutes verringert. D.h., es gibt weniger Fahren mit Leergut als mit Vollgut. Für die Rückführung des Leergutes bestehen zwei Möglichkeiten: Entweder wartet man, bis eine ganze Fuhre von Leergut zurückzuführen ist, oder man schickt das Leergut regelmäßig zurück. Durch diese Optionen ergeben sich Möglichkeiten zur Steuerung der Rundlaufzeit.

Die minimale Anzahl an Fahren, die zur Anlieferung des Tagesbedarfs notwendig sind, soll berechnet werden. Der Tagesbedarf kann je nach Auftragslage schwanken. Außerdem wird die Ladematrix der Lkws und die Auslastung der Lkws ausgegeben. Die Lkws müssen so beladen werden, dass jeder Lkw die Teile für ganze Autos anliefert. D.h., die geladenen Teile müssen in einem bestimmten Verhältnis stehen. Werden z.B. Türen und der Dachhimmel vom gleichen Lkw geliefert, so sollten vier mal so viele Türen wie Dächer geladen sein. Dazu wird zuerst die Anzahl der „walls“ je Sorte berechnet, und anschließend werden die „walls“ im richtigen Verhältnis auf die Lkws aufgeteilt. Es wird angenommen, dass die Lkws alle von einheitlicher Größe sind. Nur die Abmessungen der Gebinde variieren je nach Sorte. Es ist auch erlaubt nur halb volle Gebinde noch zu laden, wenn aufgrund der VLZ nicht mehr Teile zur Verfügung gestellt werden können.

2. Heuristik mit „walls“

„Walls“ (deutsch Wand) bestehen hier aus neben einander gestapelten gleich großen Objekten, die horizontal gleichmäßig abschließen. Unter einem Objekt soll ein Quader verstanden werden, der um 90°

drehbar ist. Ein Bin entspricht einem Lkw-Container, der 12,6 m in der Länge, 2,45 m in der Breite und 3 m in der Höhe beladbar ist. Die Länge, die Breite und die Höhe des Bins beschränken eine Wand. Durch die Einführung einer Wand soll die Restbreite im Bin minimiert werden. Die Wand soll optimal in die Breite des Bins passen, um das Bin mit möglichst vielen Objekten beladen zu können. Jede Sendung wird in „walls“ aufgeteilt.

2.1. „wall“-Eigenschaften. :

- Eine Wand liefert die maximale Anzahl von Stapeln in der Breite des Lkws.
- Die Länge einer Wand (Lademeter) ist durch die LKW-Länge beschränkt.
- Sie ist sortenrein, d.h., eine Wand besteht aus genau einer Sorte.

2.2. Arten von „walls“. „Walls“ können auf unterschiedliche Weise gebildet werden. Man unterscheidet horizontale, vertikale und gemischte „walls“. Bei horizontalen „walls“ werden die Objekte der Länge nach in die Bins geladen, bei vertikalen der Breite nach und bei gemischten „walls“ ist es eine Kombination aus horizontaler und vertikaler Beladung. Bei vertikalen „walls“ ist die Länge der Wand gleich der Breite der Gebinde, was in Abbildung 12 zu sehen ist.

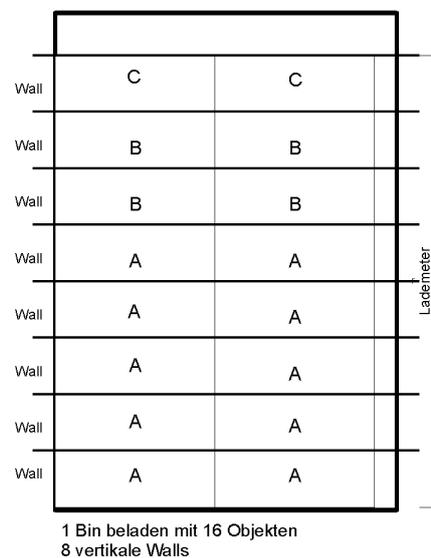


ABBILDUNG 12. vertikale „walls“

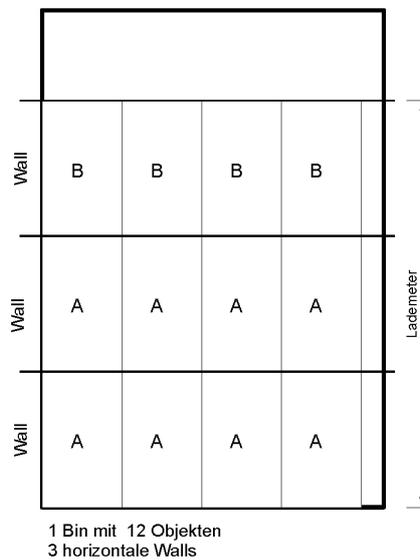


ABBILDUNG 13. horizontale „walls“

Aus Breite der Gebinde lassen sich die Lademeter bei horizontalen „walls“ berechnen.

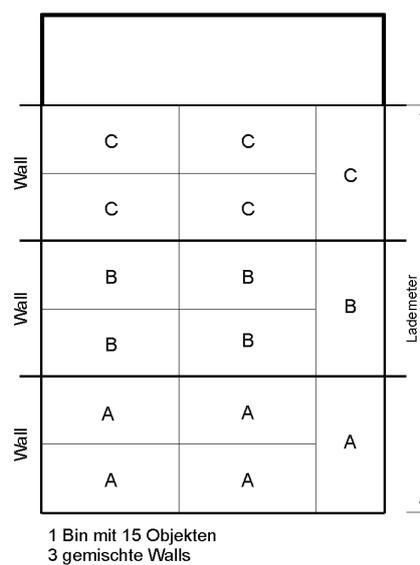


ABBILDUNG 14. gemischte „walls“

2.3. Berechnung der „walls“. Die Berechnung der „walls“ erfolgt mittels eines zwei-dimensionalen ganzzahligen linearen Programms:

$$\begin{aligned} &\text{maximiere } l * x + b * y \\ &\text{unter } l * x + y * b \leq \text{Breite des Lkws} \\ &\text{wobei } l \geq b > 0 \\ &\quad x, y \geq 0, \text{ ganzzahlig} \end{aligned}$$

ℓ ...Länge eines Stapels

b ...Breite eines Stapels

x ...Anzahl der längsseitig geladenen Stapel im Lkw

y ...Anzahl der breitseitig geladenen Stapel im Lkw

Eine optimale Verteilung kann gefunden werden, indem man im ersten Schritt berechnet, wie viele Objekte der Länge nach in die Breite des Bins passen. In die restliche Breite versucht man dann noch so viele Objekte wie möglich der Breite nach zu laden. Eine mögliche Restbreite muss für spätere Vergleiche gespeichert werden. Im zweiten Durchlauf wird die maximale Anzahl der längsseitig geladenen Objekte um eins verringert und die restliche Breite wird wieder mit möglichst vielen breitseitigen Objekten beladen. Die neue Restbreite wird mit der alten verglichen und die kleinere wird wieder gespeichert. Auf diese Weise durchläuft man alle Möglichkeiten der Verteilung der Objekte in der Breite.

Wenn aus dieser Berechnung eine horizontale Wand hervor geht, so entsprechen die verbrauchten Lademeter genau der Länge der Objekte, bei einer vertikalen Wand entsprechen sie exakt der Breite der Objekte. Bei gemischter Beladung sind die verbrauchten Lademeter gleich dem kleinsten gemeinsamen Vielfachen aus Länge und Breite der Objekte.

Für die Beladung des Lkws ist es notwendig zu wissen, wie viele Stapel in eine Wand passen beziehungsweise wie viele Lademeter noch frei sind. Die Anzahl der Stapel erhält man direkt aus der Wand-Berechnung. Je nach Wand-Art variiert jedoch die Berechnung der Lademeter:

1. Bei horizontalen Wänden entspricht die Länge der Stapel den verbrauchten Lademetern: Lademeter = ℓ
Anzahl Stapel je Wand:= $\lfloor \text{zulässige Lkw Breite} / b \rfloor$
2. Bei vertikalen Wänden entspricht die Breite der Stapel den verbrauchten Lademetern: Lademeter = b
Anzahl Stapel je Wand:= $\lfloor \text{zulässige Lkw Breite} / \ell \rfloor$
3. Bei gemischten Wänden berechnet sich die Länge der verbrauchten Lademeter aus dem kgV (ℓ, b), falls das kgV \leq Länge des Lkws ist, sonst ist sie 0.
Anzahl Stapel je Wand:= Lademeter * $(\frac{x_{opt}}{b} + \frac{y_{opt}}{\ell})$

Wenn die Wand in den Lkw passt, wird berechnet, wie viele Lademeter im Lkw noch frei sind. Abhängig davon kann entweder noch eine neue Wand geladen werden oder der Lkw ist schon optimal beladen und wird zum Werk geschickt.

Passt die Wand nicht in den Lkw, weil sie zu lange ist, so muss sie gekürzt werden. Dazu berechnet man bei gemischter Beladung, wie oft die Länge eines Gebindes in die Restlänge des Lkws passt. Um die Anzahl der horizontal zu ladenden Stapel zu berechnen, dividiert man die verbrauchten Lademeter durch die Breite der Gebinde und rundet diese Zahl ab.

Wenn die Wand bei rein vertikaler Beladung nicht in den Lkw passt, dann wird noch getestet, ob ein Stapel horizontal in den Lkw passt. Ist das auch nicht möglich, so ist der Lkw optimal beladen und kann abgeschickt werden.

3. Programm in Java

3.1. Globale Parameter. Diese Parameter sind spezifisch für jeden Standort einzugeben.

- Anzahl der Autos pro Tag (300#; 500#; 1000#)
- Taktzeit = 2,3 min
- Lkw Abmessungen [mm](13600/2450/3000)
- Ladezeit = 10 min
- Schichtzeit = 1080 min
- Fahrzeit abhängig vom Standort des Modulcenters

3.2. Angaben zu jeder Sorte. Von jeder Sorte müssen der Name, die Vorlaufzeit, die Lieferantenproduktionszeit, die Bandanstellungszeit, der Zeitpuffer, die Anzahl der zur Produktion notwendigen Montagetakte, die Abmessungen der Gebinde, die Anzahl der Teile pro Gebinde und das Dock, an das sie geliefert werden muss, eingegeben werden. Sollte ein Gebinde zwar stapelbar sein, aber es darf aus Sicherheitsgründen nicht gestapelt werden, so muss die Höhe des Gebindes formal auf über 1,5 m gesetzt werden. (Die Lkw Höhe beträgt 3 m. Um ein Gebinde stapeln zu können muss es in der Höhe kleiner als 1,5 m sein.)

Zieht man von der VLZ die Fahrzeit und Be- und Entladezeit des Lkws ab, so erhält man die „Zusammenstellzeit“. Darunter soll die Zeit im MC verstanden werden, die zur Sequenzierung, Vormontage und Bereitstellung der Teile benötigt wird. Die maximale zeitliche Anzahl

der Teile pro Lkw kann dann wie folgt berechnet werden:

$$\begin{aligned} \text{Restzeit} &= \text{Zusammenstellzeit} \\ &\quad - \text{Vorbereitungszeit} \\ &\quad - \text{Montagetakte} * \text{Taktzeit} \\ &\quad - \text{Bandanstellung} \\ &\quad \text{Zeitpuffer} \end{aligned}$$

$$\text{Stück} = \lfloor \text{Restzeit} / \text{Taktzeit} \rfloor$$

$$\text{Stück} + 1 = \text{maximal zeitlich ladbare Teile pro Lkw}$$

Daraus lässt sich auch die Anzahl der Fuhren berechnen, um alle Teile anzuliefern. (Anzahl der Fuhren = Anzahl Teile pro Tag / maximal zeitlich ladbare Teile pro Lkw)

Die Frequenz einer Sorte besagt, wie oft pro Tag Lkws mit dieser Sorte beladen vom MC zum Werk geschickt werden müssen. (Frequenz = 1080/VLZ)

3.3. Anzahl der Teile pro Tag. Aus der VLZ ergibt sich die Anzahl der Teile pro Sendung. Daraus wird die Anzahl der Gebinde bzw. der Stapel pro Sendung berechnet.

3.4. Sendung. Die Teile werden nach dem Sendungszeitpunkt geordnet. Der Sendungszeitpunkt berechnet sich aus der Vorlaufzeit. Haben zwei Teile den gleichen Sendungszeitpunkt, so wird absteigend nach der Fläche sortiert.

3.5. Fuhre. Eine Sendung wird abhängig von der Lieferfrequenz der Sorte auf Fuhren aufgeteilt. Eine Fuhre setzt sich aus Stapeln zusammen, die ein Lkw an genau ein Dock liefert. Der späteste Startzeitpunkt des Lkws wird durch die Sorte mit der kürzesten VLZ bestimmt. Der Lkw kann auch früher starten, wenn er der Fläche nach voll beladen ist. Nach einem Rundlauf kann der Lkw wieder mit einer neuen Fuhre beladen werden.

3.6. Lkw. An jeden Lkw, der zum ersten Mal verwendet wird, wird eine Nummer vergeben. Ein neuer Lkw wird erzeugt, wenn kein anderer zur Verfügung steht, um die Stapel zu transportieren. Es gibt zwei Listen mit Lkws, eine mit verfügbaren, d.h., solchen, die im MC zur Beladung bereitstehen, und eine mit Lkws, die unterwegs sind, also zur Zeit nicht neu mit Vollgut beladen werden können. Nach einem Rundlauf wird der Status des Lkws von „unterwegs“ wieder auf „verfügbar“ gesetzt. Ein Lkw wird so lange beladen, bis keine Zeit mehr zum Beladen zur Verfügung steht oder keine Stapel mehr auf die Ladefläche passen. Diese räumliche Beschränkung wird durch die Restlänge der freien Lademeter überprüft.

3.7. Bin Packing. Nachdem die verschiedenen Sorten entsprechend ihrer VLZ in Sendungen aufgeteilt worden sind, werden diese wiederum in „walls“ aufgeteilt. Eine horizontale oder vertikale Wand wird auf den Lkw geladen, wenn die Restlänge der freien Lademetrier größer gleich der Wandlänge ist. Hat die vertikale Wand einen Platz mehr im Lkw, dann wird getestet, ob Stapel dieser Wand noch horizontal geladen werden können. Eine gemischte Wand passt in den Lkw, wenn das kleinste gemeinsame Vielfache von Länge und Breite eines Stapels kleiner gleich die freien Lademetrier ist. Sonst muss die Wand gekürzt werden. Falls nichts mehr von den Stapeln dieser Sorte geladen werden kann, aber noch Zeit zum Beladen vorhanden ist, dann können noch andere Sorten, die zum gleichen Dock müssen, geladen werden. Der Lkw fährt zum Werk, wenn nichts mehr zusätzlich geladen werden kann oder keine Zeit mehr zum Laden ist. Sobald alle Stapel geliefert wurden, stoppt der Algorithmus.

KAPITEL 11

Auswertung

1. Globale Parameter

Die Rundlaufzeit (RLZ) zwischen dem Werk und dem Standort eines MCs ist konstant. Sie setzt sich aus der Hin- und Rückfahrt des Lkws sowie der Be- und Entladung des Lkws mit Voll- und Leergut zusammen. Die Lkws fahren abhängig vom Bedarf unterschiedlich viele Rundläufe pro Tag.

Im Falle eines MCs in der Umgebung von Graz wird angenommen, dass die Fahrzeit 20 min und die Ladezeit durchschnittlich je 10 min lang dauert. Daraus ergibt sich eine RLZ von 80 Minuten ($=2*20 \text{ min} + 4*10 \text{ min}$). An einem Arbeitstag von 1080 min kann ein Lkw maximal 13 RL schaffen.

Nützt man ein MC in Pesnica verlängert sich die Fahrzeit auf 63 min, wodurch sich die RLZ bei gleich bleibender Ladezeit auf 166 min erhöht und sich die Anzahl der RL auf 6,5 halbiert. 6,5 Rundläufe bedeuten, dass die Teile beim letzten RL nur noch vom MC zum Werk geführt werden.

Nachdem der Standort ausgewählt wurde, können die Daten für die Fahrzeit ins Modell eingegeben werden. Weitere fest zu setzende Parameter sind die Zeit für die Band-Anstellung und den Linien-Puffer, die Taktzeit, die Arbeitszeit pro Tag, die Anzahl der produzierten Autos pro Tag und die Lkw-Abmessungen.

Globale Parameter	[min]
Fahrzeit Messendorf / Pesnica	20 / 63
Lkw Be- / Entladung	je 10
Band-Anstellung	20
Linien-Puffer	30
Taktzeit	2,54

TABELLE 9. Globale Parameter für ein MC

Alle Lkws haben eine Länge von 13,6 m, eine Breite von 2,5 m und eine Höhe von 3 m. Die zulässige Beladung in der Breite beträgt jedoch nur 2,45 m, um die Stapel leichter laden zu können. Auch die Anzahl der täglich produzierten Autos muss fest vorgegeben werden, wobei diese Zahl je nach Auftragslage schwankt. Kurzfristig unterliegt

die Produktion nur kleinen Schwankungen. Langfristig können neue Projekte dazukommen oder auslaufen. Daher wurde das Modell auch mit unterschiedlichen Produktionsmengen getestet, um zu sehen, wie sich die Auslastung und die Anzahl der benötigten Lkws verändert.

Die Auslastung der Lkws hängt einerseits von der Länge, Breite und Höhe der Gebinde ab, andererseits aber vor allem von der Vorlaufzeit jeder Teilsorte. Da ein Lkw nur ein Dock beliefern darf, werden die Teile dementsprechend vorsortiert. D.h., ein Lkw kann zwar verschiedene Sorten transportieren, aber nur wenn sie zum selben Dock geliefert werden müssen.

2. Produktion im MC in Messendorf

Das Modell wird mit 13 Teilsorten, die an 6 verschiedene Docks geliefert werden müssen, simuliert. Es soll für 300, 500 und 1000 produzierte Autos pro Tag getestet werden. Ein Arbeitstag dauert 1080 Minuten (18 h), der sich in zwei Schichten zu je 9 Stunden teilt. Die Taktzeit wurde mit 2,3 min festgelegt.

- Die Füllmenge bezeichnet die Anzahl der Teile pro Gebinde.
- Die Lieferantenproduktionszeit (LFPZ) dient hauptsächlich der Modul-Vormontage.
- VBZ = vorbereitende Tätigkeiten im MC
- Band = Band-Anstellung (Wartezeit am Band vor der Verarbeitung)
- #Takte = notwendige Anzahl der Takte zur Produktion des ersten Teils einer Sorte

Name	Tür	Cockpit	Dach
VLZ [min]	297	175	136
VBZ [min]	0	27	0
LFPZ [min]	0	0	0
Band-Anst. [min]	20	20	20
Zeitpuffer [min]	30	30	30
Takte [#]	4	13	2
l [mm]	1200	1600	2600
b [mm]	1200	800	1500
h [mm]	1450	2000	2410
Stapelfaktor	2	1	1
Füllmenge [#]	16	2	8
Teile / Fzg.	4	1	1

TABELLE 10. Daten der Teile für Lieferung an Dock 1

2.1. Testdaten für Dock 1. Im oberen Teil der Tabelle 10 sind die Vorlaufzeit, die Vorbereitungszeit, die Zeit für die Produktion beim Lieferanten, die Band-Anstellung und die notwendige Anzahl der Takte zur Produktion des ersten Teils für die Sorten „Tür“, „Cockpit“, und „Dach“ angegeben. Im unteren Teil der Tabelle findet man Abmessungen und Füllmenge der jeweiligen Gebinde.

#Autos/Tag	#Türen	#Cockpits	#Dächer	#Fuhren	RL/Lkw	#Lkws
300	1200	300	300	54	9	6
500	2000	500	500	89	12-13	7
1000	4000	1000	1000	176	12-13	13

TABELLE 11. # Lkws für Dock 1 abh. v. der Tagesproduktion

RL: Anzahl der Rundläufe eines Lkws pro Tag

RLZ: Rundlaufzeit = 4 * Ladezeit + 2 * Fahrzeit

#Autos/Tag	#„walls“ Tür	#„walls“ Cockpit	#„walls“ Dach	FG[%]
300	28	60	48	26
500	46	110	81	26,7
1000	92	230	159	27

TABELLE 12. FG abhängig von der Tagesproduktion

Die hier angeführten Füllgrade sind Durchschnittswerte. Sie berechnen sich aus der Summe der Füllgrade aller Lkw-Anlieferungen eines Tages für ein bestimmtes Dock dividiert durch die Anzahl der Fuhren. Ein niedriger Füllgrad wie in Tabelle 12 lässt bei optimaler Beladung auf eine kurze Vorlaufzeit schließen. Daher ist eine Auslagerung der Teilsorten für Dock 1 nach Messendorf abzulehnen.

2.1.1. **Ladematrix bei nur räumlicher Beschränkung.** Vernachlässigt man die VLZ, sodass der Lkw in einem bestimmten Verhältnis, allein unter Berücksichtigung der räumlichen Beschränkungen und unter Anwendung von „walls“, beladen werden kann, dann erhält man eine Beladung mit meist deutlich höherem Füllgrad. In Abbildung 15 wird die Ladematrix für Dock 1 mit ausschließlich räumlichen Einschränkungen und unter Berücksichtigung des richtigen Ladeverhältnisses veranschaulicht.

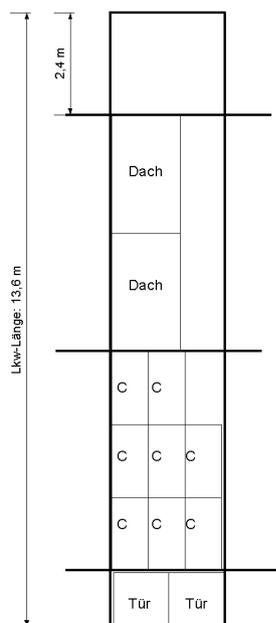


ABBILDUNG 15. Ladematrix für Dock 1 ohne VLZ

Da die Teile in einem bestimmten Verhältnis zueinander geladen werden sollen, ergibt sich für die Teile, die zu Dock 1 transportiert werden müssen, folgendes Ladeverhältnis: 4 Türen müssen gleichzeitig mit einem Cockpit und einem Dach geliefert werden.

Um den Laderaum optimal auszunutzen, ist es sinnvoll ganze Stapel zu laden. Die Mindestbeladung ergibt sich ausgehend von den Teilen für einen Stapel Türen. Ein Stapel mit Türen enthält 32 Teile. Daher muss man noch jeweils 8 Cockpits (4 Stapel) und 8 Dächer (1 Stapel)

dazu laden. In eine Wand passen räumlich 2 Stapel Türen, also 64 Türen. Zu den 64 Türen benötigt man 16 Cockpits und 16 Dächer. Daraus ergeben sich zusätzlich 8 Stapel mit Cockpits und 2 Stapel mit Dächern. Da ausreichend Platz vorhanden ist, können alle Stapel gleichzeitig in einem Lkw geliefert werden. Es wird immer versucht, ein Vielfaches der Mindestbeladung zu laden, sofern genügend Platz (und Zeit) vorhanden ist. Der Füllgrad bei dieser Beladung beträgt 62,8 %.

2.2. Testdaten für Dock 2. Da nur Sitze dorthin geliefert werden müssen, vereinfacht sich die Beladung der Lkws.

Name	Sitze
VLZ [min]	260
VBZ [min]	20
LFPZ [min]	0
Band-Anst. [min]	20
Zeit-Puffer [min]	30
Takte [#]	13
l [mm]	1600
b [mm]	1200
h [mm]	1450
Stapelfaktor	2
Füllmenge [#]	1
Teile / Fzg.	1

TABELLE 13. Daten der Teile für Lieferung an Dock 2

#Autos/Tag	#Fuhren	RL/Lkw	#Lkws
300	12	12	1
500	19	9-10	2
1000	38	12-13	3

TABELLE 14. # Lkws für Dock 2 abh. v. der Tagesproduktion

Die Anzahl der zu liefernden Sitze ist gleich der Anzahl der zu produzierenden Autos.

#Autos/Tag	#,wells“ Sitze	FG[%]
300	84	78,4
500	133	80,3
1000	266	80,3

TABELLE 15. FG abhängig von der Tagesproduktion

Der hohe Füllgrad ist auf eine relativ lange Vorlaufzeit zurückzuführen.

2.2.1. **Ladematrix bei nur räumlicher Beschränkung.** Die Lkws werden mit Hilfe von horizontalen „walls“, in die je zwei Stapel aus je 2 Gebinden passen, beladen. Eine Wand besteht somit aus 4 Sitzen. In einen optimal beladenen Lkw passen 8 ganze horizontale „walls“ und damit 32 Sitze. 0,8 Lademeter bleiben ungenutzt. Daher ergibt sich ein maximaler Füllgrad von 94%. Wegen des hohen Füllgrads ist eine Auslagerung nach Messendorf zu befürworten.

2.3. Testdaten für Dock 3. Vier verschiedene Sorten, „Vorderachsen CEM“ (VA CEM), „Vorderachsen links + rechts“ (VA l+r), „Hinterachsen“ (HA) und „Stoßdämpfern“ (St) müssen zu Dock 3 geliefert werden.

Name	VA CEM	VA l+r	HA	St l+r
VLZ [min]	221	219	228	205
VBZ [min]	0	0	0	0
LFPZ [min]	0	0	0	0
Bandanst. [min]	20	20	20	20
Zeit-Puffer [min]	30	30	30	30
Takte [#]	9	9	28	1
l [mm]	1800	2400	1800	600
b [mm]	1200	1400	925	600
h [mm]	1450	1000	600	950
Stapelfaktor	2	3	5	3
Füllmenge [#]	3	9	1	15
Teile / Fzg.	1	2	1	2

TABELLE 16. Daten der Teile für Lieferung an Dock 3

#Autos/Tag	#VA CEM	#VA l+r	#HA	#St l+r
300	300	600	300	600
500	500	1000	500	1000
1000	1000	2000	1000	2000

TABELLE 17. # zu liefernder Teile für Dock 3 abh. v. der Tagesproduktion

Für die 4 verschiedenen Sorten, die zu Dock 3 transportiert werden müssen, ergibt sich folgendes Ladeverhältnis: Je eine Vorderachse CEM und eine Hinterachse müssen zusammen mit 2 Vorderachsen (links + rechts) und 2 Stoßdämpfern geliefert werden.

#Autos/Tag	#Fahren	RL/Lkw	#Lkws
300	73	10-11	7
500	121	9-10	12
1000	240	11-12	21

TABELLE 18. # Lkws für Dock 3 abh. v. der Tagesproduktion

#Autos/Tag	#„walls“ VA CEM	#„walls“ VA l+r	#„walls“ HA	#„walls“ St. l+r	FG[%]
300	28	26	30	12	22,7
500	44	42	64	20	24,6
1000	84	84	124	40	24,2

TABELLE 19. FG abhängig von der Tagesproduktion

Der geringe Füllgrad ist auf die kurze Vorlaufzeit und die Annahme, dass die Teile nicht gleichzeitig bearbeitet werden können, zurückzuführen.

2.3.1. *Optimale Ladematrix bei paralleler Produktion.* Es müssen doppelt so viele Vorderachsen links + rechts und Stoßdämpfer links + rechts wie Vorderachsen CEM und Hinterachsen geliefert werden.

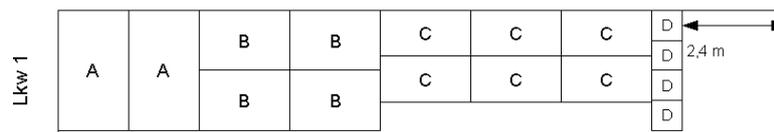
Die Zeit für die Beladung ergibt sich aus der kürzesten VLZ aller Sorten, die in diesem Fall von den Hinterachsen bestimmt wird. Falls alle Teile parallel bereitgestellt werden können, bleiben für jeden Teil 74 min bis zum Laden. In dieser Zeit können 15 Vorderachsen CEM, 15 Hinterachsen, 30 Vorderachse li+re und 30 Stoßdämpfer schon im richtigen Verhältnis produziert werden. Daraus können wiederum 3 Stapel VA CEM, 2 Stapel VA li+re, 3 Stapel HA und ein Stapel Stoßdämpfer erstellt werden. Somit ergeben sich insgesamt 7 „walls“, jeweils 2 der Sorten VA CEM, VA li+re, HA und eine aus Stoßdämpfern, die 10,6 Lademeter lang sind. ($2 \cdot 1,8 \text{ m} + 2 \cdot 1,4 \text{ m} + 2 \cdot 1,8 \text{ m} + 1 \cdot 0,6 \text{ m} = 10,6 \text{ m}$) Der optimale FG beträgt daher 77,9%. In Abbildung 16 ist die optimale zeitliche Beladung bei paralleler Produktion dargestellt. 2,4 Lademeter bleiben leer, weil das zeitliche Kontingent zur Bereitstellung der Teile aufgebraucht ist.

Die zeitliche Restriktion dominiert in diesem Fall die räumliche Beschränkung des Lkws. D.h., es könnte zwar theoretisch mehr geladen werden, weil noch genügend Lademeter frei sind, in die eine oder mehrere „walls“ abhängig von der zu ladenden Sorte passen würden, aber die Vorlaufzeit reicht dafür nicht aus.

Sorte	VA CEM	VA l+r	HA	St l+r
# Teile pro Fzg.	1	2	1	2
max. # Teile bei zeitl. Beladung (*)	15	30	15	30
# Stapel aus *	3	2	3	1
#„walls“ aus *	2	2	2	1
Lademeter	3,6	2,8	3,6	0,6

TABELLE 20. Optimale zeitliche Beladung bei paralleler Produktion

Lkw Beladung für Dock 3
Teile im richtigen Verhältnis



Füllgrad: 82,4 %

A: Vorderachsen li+re
C: Hinterachsen

B: Vorderachsen CEM
D: Stoßdämpfer

ABBILDUNG 16. Ladematrix für Dock 3 ohne VLZ-Beschränkung

2.3.2. **Ladematrix bei nur räumlicher Beschränkung.** In eine Wand passen räumlich 12 Teile Vorderachse CEM, 10 Teile Hinterachsen, 27 Teile Vorderachsen li+re und 180 Teile Stoßdämpfer. Das kleinste gemeinsame Vielfache von diesen Mengen unter Berücksichtigung des richtigen Verhältnisses ist 540 für die Vorderachsen CEM und Hinterachsen bzw. 1080 für die Vorderachsen li+re und die Stoßdämpfer. So erhält man 45 „walls“ Vorderachsen CEM mit insgesamt 81 Lademetern, 54 „walls“ Hinterachsen à 97,2 m, 40 „walls“ Vorderachsen li+re à 56 m und schließlich 10 „walls“ mit Stoßdämpfern à 6 m. Es ist weder möglich, alle „walls“ in einen Lkw zu bekommen, noch das Ladeverhältnis exakt einzuhalten, wenn „walls“, die mit maximal vielen Teilen gefüllt sind, verwendet werden. Es müssen offensichtlich mehrere Lkws gleichzeitig weggeschickt werden, um alle Bedingungen erfüllen zu können.

Name	VA CEM	VA l+r	HA	St l+r
# „walls“/Tag	45	40	54	10
Lm aller „walls“	81	56	97,2	6
max. # „walls“/Lkw	7	9	7	22
# Lkw	6	5	8	0
FG [%]	97	4Lkws à 97; 1Lkw à 94	7Lkws à 92,6; 1Lkw à 52,9	0

TABELLE 21. Optimale räumliche Beladung

Lm ist in Tabelle 21 die Abkürzung für Lademeter.

Bei einer Beladung mit dem First-Fit-Decreasing Algorithmus benötigt man 5 Lkws für die Teile Vorderachse li+re, wobei 4 Lkws mit 9 „walls“ beladen sind und noch 1 Lademeter frei haben und ein Lkw mit den restlichen 4 „walls“ beladen ist und noch über 8 Lademeter verfügt. Der nächst kleinere Teil sind die Vorderachsen CEM, für die 6 Lkws benötigt werden. 6 Lkws belädt man mit 7 „walls“. Dabei bleibt wieder je 1 Lademeter frei. Es müssen noch 3 „walls“ geladen werden, die alle in den 5. Lkw passen, der mit Vorderachsen li+re beladen ist. Trotzdem bleiben noch immer 2,6 Lademeter frei. Die Hinterachsen werden auf 7 Lkws aufgeteilt, wobei je 1 Lademeter frei bleibt. Von den restlichen 5 „walls“ kann eine noch in den 5. Lkw mit Vorderachse li+re geladen werden, die anderen müssen in einen neuen Lkw gepackt werden, der nur zu 7,2 Lademeter angefüllt ist. Da eine Wand Stoßdämpfer nur 0,6 m hat, können diese 10 „walls“ leicht auf die anderen Lkws aufgeteilt werden. 6 „walls“ kommen zu den Lkws mit Vorderachsen CEM und 4 „walls“ zu den Lkws mit Vorderachsen li+re.

2.4. Testdaten für Dock 4. Da dieses Dock ausschließlich mit den hinteren Stoßdämpfern beliefert wird, ist die Ladematrix der Lkws einfach zu erstellen. Die Anzahl der Autos ist gleich der Anzahl der benötigten Stoßdämpfer.

Name	Stoßdämpfer hinten
[min]	267
VBZ [min]	0
LFPZ [min]	0
Bandanst. [min]	20
Zeit-Puffer [min]	30
Takte [#]	5
l [mm]	2300
b [mm]	1200
h [mm]	2000
Stapelfaktor	1
Füllmenge [#]	8
Teile / Fzg.	1

TABELLE 22. Daten der Teile für Lieferung an Dock 4

#Autos/Tag	#Fahren	RL/Lkw	#Lkws
300	5	5	1
500	7	7	1
1000	14	7	2

TABELLE 23. # Lkws für Dock 4 abh. v. der Tagesproduktion

#Autos/Tag	#„walls“ Stoßdämpfer hi	FG[%]
300	20	69,3
500	35	78
1000	70	78

TABELLE 24. FG abhängig von der Tagesproduktion

Der hohe Füllgrad ist einerseits auf die lange Vorlaufzeit zurückzuführen, wodurch 72 Teile für eine Fuhre bereitgestellt werden können.

Andererseits basiert er auf der Tatsache, dass die Gebinde nicht stapelbar sind und nur 2 Stapel à 8 Teile in eine Wand passen und daher viel Platz verbraucht wird. Die 11,5 Lademeter resultieren daraus, dass eine Wand 2,3 m lang ist und 5 „walls“ gebraucht werden. Daraus ergibt sich ein maximaler FG von 86,7% bei zeitlicher Beschränkung.

2.4.1. ***Optimale Ladematrix ohne zeitliche Beschränkung.***
Eine Wand der Sorte Stoßdämpfer hinten besteht aus 2 Stapeln, die horizontal angeordnet sind. In einen Lkw passen räumlich 5 ganze „walls“. Dann verbleiben noch 2,1 Lademeter, in die noch ein zusätzlicher Stapel vertikal geladen werden kann. Insgesamt werden so 12,7 Lademeter ausgenutzt. Das ergibt einen maximalen Füllgrad von 93%.

2.5. Testdaten für Dock 5. Die Lieferung an Dock 5 besteht nur aus Frontends. Pro Auto wird genau ein Frontend verbaut. Die Ladematrix ist ähnlich wie bei den Stoßdämpfern für Dock 4.

Name	Frontend
VLZ [min]	267
VBZ [min]	0
LFPZ [min]	0
Bandanst. [min]	20
Zeit-Puffer [min]	30
Takte [#]	9
l [mm]	2000
b [mm]	800
h [mm]	2000
Stapelfaktor	1
Füllmenge [#]	2
Teile / Fzg.	1

TABELLE 25. Daten der Teile für Lieferung an Dock 5

#Autos/Tag	#Führen	RL/Lkw	#Lkws
300	10	5	2
500	16	8	2
1000	30	7-8	4

TABELLE 26. # Lkws für Dock 5 abh. v. der Tagesproduktion

#Autos/Tag	#„walls“ Frontend	FG[%]
300	57	73,4
500	98	77,9
1000	190	83,7

TABELLE 27. FG abhängig von der Tagesproduktion

Der hohe Füllgrad ist einerseits auf die lange Vorlaufzeit zurückzuführen. Da die VLZ vom Frontend identisch ist mit der vom Stoßdämpfer hinten für Dock 4, können wieder 72 Teile für eine Fuhre bereitgestellt werden. Andererseits basiert der hohe FG auf der Tatsache, dass

die Gebinde wieder nicht stapelbar sind und nur 3 Stapel (3 Gebinde) à 2 Teile in eine Wand passen und daher viel Platz verbraucht wird. Daher braucht man 24 Lademeter für 72 Teile, die jedoch räumlich nicht in 1 Lkw passen. Da eine Wand 2 m lang ist, kann man diese Fuhre auf 2 Lkws zu gleichen Teilen aufteilen. Bei 12 Lademetern ergibt sich ein maximaler FG von 88,2% bei zeitlicher Beschränkung.

2.5.1. ***Optimale Ladematrix ohne zeitliche Beschränkung.***
Eine Wand der Sorte Frontend setzt sich aus 3 Stapeln zusammen, die horizontal angeordnet sind. In einen Lkw passen räumlich 6 ganze „walls“. Dann verbleiben noch 1,6 Lademeter, in die noch zusätzlich 2 Stapel vertikal geladen werden können. Insgesamt werden so 13,6 Lademeter ausgenutzt. Das ergibt einen maximalen Füllgrad von 100%.

2.6. Testdaten für Dock 6. Dock 6 wird mit Abgasanlagen und Kompletträdern im Verhältnis 1:4 beliefert.

Name	Abgasanlage	Kompletträder
VLZ [min]	290	294
VBZ [min]	0	0
LFPZ [min]	0	0
Band-Anst. [min]	20	20
Zeit-Puffer [min]	30	30
Takte [#]	3	6
l [mm]	4170	1600
b [mm]	1200	800
h [mm]	1470	1100
Stapelfaktor	2	2
Füllmenge [#]	7	8
Teile / Fzg.	1	4

TABELLE 28. Daten der Teile für Lieferung an Dock 6

#Autos/Tag	#Abgasanlagen	#Kompletträder	#Fuhren	RL/Lkw	#Lkws
300	300	1200	19	6-7	3
500	500	1500	31	10-11	3
1000	1000	4000	61	12-13	5

TABELLE 29. # Lkws für Dock 6 abh. v. der Tagesproduktion

#Autos/Tag	#„walls“ Abgasanlage	#„walls“ Räder	FG[%]
300	12	25	86,9
500	18	42	84,3
1000	36	84	84,1

TABELLE 30. FG abhängig von der Tagesproduktion

Der hohe Füllgrad ist auf die lange Vorlaufzeit zurückzuführen. Eine Wand gefüllt mit Abgasanlagen besteht aus 2 Stapeln und hat eine Länge von 4,17 m. Sie enthält 28 Teile. Eine Wand mit Kompletträdern enthält 3 Stapel mit insgesamt 48 Teilen und misst nur 1,6 m. Unter Berücksichtigung der Zeit könnten mit einer Fuhre maximal 3

volle „walls“ Abgasanlagen und 6 „walls“ Kompletträder geliefert werden, wobei die letzte „wall“ aus Zeitmangel nicht voll beladen ist. Das ergibt 22,11 Lademeter, die nicht in einen Lkw passen und auf 2 Lkws aufgeteilt werden müssen. Berücksichtigt man zusätzlich das Ladeverhältnis von 1:4, so können nur noch 1 Wand mit 28 Abgasanlagen und 3 „walls“ mit 112 Kompletträdern geladen werden. Dafür werden 8,97 Lademeter benötigt, was einen Füllgrad von 65,9% ergibt.

Name	Abgasanlage	Kompletträder
# pro „wall“	28	48
# Teile pro Fzg.	1	4
max. # Teile bei zeitl. Beladung (*)	84	83
# Stapel aus *	6	6
# „walls“ aus *	3	2
Lademeteraus *	12,51	3,2

TABELLE 31. Lieferung an Dock 6 bei zeitlicher Restriktion

2.6.2. *Optimale Ladematrix ohne zeitliche Beschränkung.*

Eine mit Abgasanlagen befüllte Wand besteht aus 28 Teilen, eine mit Kompletträdern befüllte aus 48 Teilen. Das kleinste gemeinsame Vielfache der Teile ist 336. Da vier mal so viele Räder geliefert werden müssen, ist es notwendig, 336 Abgasanlagen zusammen mit 1344 Kompletträdern zu laden. Das Problem dabei ist, dass nicht so viele Räder benötigt werden. Entweder man liefert zu viele Räder und lagert sie im Hauptlager des Werks oder man liefert genau so viele wie benötigt, hat dafür aber keine maximal befüllten „walls“. Bei Lieferung von 336 Abgasanlagen und 1344 Kompletträdern entspricht das 12 „walls“ mit Abgasanlagen und 28 „walls“ mit Kompletträdern. Insgesamt müssten dann $50,04 + 44,8 = 94,84$ Lademeter auf 7 Lkws aufgeteilt geliefert werden.

Bei einer Stückzahl von 300 Autos pro Tag sind 11 „walls“ Abgasanlagen und genau 25 „walls“ der anderen Sorte erforderlich. 3 der 8 benötigten Lkws könnten dann mit je 1 Wand Abgasanlagen und je 5 „walls“ Kompletträdern beladen werden, was einen FG von 89,5% ergibt. Weitere 3 Lkws könnte man mit 2 „walls“ Abgasanlagen und 3 „walls“ Kompletträdern beladen. Daraus ergibt sich ein FG von 96,6%. Der letzte Lkw wird noch mit 2 „walls“ Abgasanlagen und 1 Wand Kompletträdern beladen. Dieser hätte nur einen FG von 73%. Daraus ergäbe sich ein durchschnittlicher FG von 90,3%.

3. Produktion im MC in Pesnica

Verlagert man die Produktion aus wirtschaftlichen Gründen ins Ausland, z.B. nach Pesnica, so verlängert sich die Fahrzeit auf 63 min. Die Ladezeit bleibt mit je 10 min gleich lang. Daraus ergibt sich eine neue RLZ von $2 \cdot 63 \text{ min} + 4 \cdot 10 \text{ min} = 166 \text{ Minuten}$. Die Lkws können maximal 6,5 RL pro Tag fahren.

Ansonsten werden die Testdaten nicht verändert.

3.1. Testdaten für Dock 1. Die Sorten Cockpit und Dach können nicht aus dem MC in Pesnica angeliefert werden, weil die jeweiligen Vorlaufzeiten zu kurz sind. Eine Anlieferung der Türen ist jedoch möglich. Für jedes Auto werden 4 Türen benötigt.

#Autos/Tag	# Türen	#Fuhren	RL/Lkw	#Lkws
300	1200	18	6	1
500	2000	30	6	2
1000	4000	59	5-6	3

TABELLE 32. # Lkws bei Produktion in Pesnica für Dock 1

#Autos/Tag	#„walls“ Türen	FG[%]
300	36	13,4
500	60	13,4
1000	118	13,4

TABELLE 33. FG bei Teilen für Dock 1

Obwohl die Sorte „Tür“ mit 297 min die längste Vorlaufzeit aller getesteten Teile aufweist, ist der FG mit durchschnittlichen 13,4% sehr niedrig. Der Grund für so eine schlechte Auslastung der Lkws liegt darin, dass in einem Gebinde 16 Teile Platz haben und dass die Gebinde stapelbar sind. Zeitlich können höchstens 68 Türen geladen werden, die in 3 Stapeln geliefert werden können. 3 Stapel bilden wiederum 2 „walls“, die nur 2,4 m lang sind. Insgesamt wird nur 13,4% der Ladefläche genutzt. Eine Auslagerung der Teile für Dock 1 nach Pesnica ist nicht zu befürworten, weil nicht alle Teile von dort geliefert werden können. Außerdem ist der Füllgrad niedriger und die Anzahl der RL eines Lkws ist geringer, was eine größere Zahl an Lkws und damit an Kosten verursacht.

3.2. Testdaten für Dock 2. Sitze sind sehr arbeitsintensiv, weil sie 12 Takte bei der Herstellung benötigen. Außerdem fällt noch Zeit für vorbereitende Tätigkeiten im MC an. Daher ist die VLZ sehr kurz, so dass maximal 8 Sitze rechtzeitig für eine Fuhre fertig gestellt werden können. Da ein Sitz genau in ein Gebinde passt und die Gebinde stapelbar sind, erhält man 4 Stapel je Fuhre.

#Autos/Tag	Fuhren	RL/Lkw	#Lkws
300	38	6 - 6,5	6
500	63	6 - 6,5	10
1000	125	5 - 6	21

TABELLE 34. # Lkws bei Produktion in Pesnica für Dock 2

Die Lkws sind zwar zeitlich mit 6,5 RL maximal ausgelastet, jedoch ist die räumliche Auslastung suboptimal. Daher werden auch sehr viele Lkws benötigt.

#Autos/Tag	#,„walls“ Sitze	FG[%]
300	76	24,1
500	126	24,1
1000	250	24,1

TABELLE 35. FG bei Teilen für Dock 2

4 Stapel bilden 2 „walls“, die 24,1% der Ladefläche benötigen. Von einer Auslagerung nach Pesnica ist abzuraten, weil der Füllgrad der Lkws im Vergleich mit der Auswertung von Messendorf um zwei Drittel geringer ist. Der niedrige Füllgrad bedingt eine große Zahl an Lkws, die wiederum sehr kostenintensiv sind. Obwohl die Sitze sehr arbeitsintensiv sind, und Personalkosten in Pesnica gespart werden könnten, sind die Gesamtkosten bei einer Produktion in Pesnica trotzdem nicht geringer, weil die Kosten für Lkw und Fahrer steigen.

#Autos/Tag	#Fahren	RL/Lkw	#Lkws
300	73	5-6	14
500	121	5-6	21
1000	240	5-6	41

TABELLE 36. # Lkws bei Produktion in Pesnica für Dock 3

#Autos/Tag	#,„walls“ VA COM	#,„walls“ HA	#,„walls“ VA l+r	#,„walls“ St	FG[%]
300	42	44	30	20	17
500	70	72	51	33	15,9
1000	138	144	102	65	15,9

TABELLE 37. FG bei Teilen für Dock 3

3.3. Testdaten für Dock 3. Der FG bei der Lieferung aus dem MC in Messendorf ist mit rund 24% nur um ca. 8% höher als der bei der Lieferung aus dem MC in Pesnica. Von einer Auslagerung sollte man trotzdem absehen, weil die 3,5-fache Anzahl der Lkws bei einer Belieferung aus Pesnica benötigt wird.

#Autos/Tag	#Fahren	RL/Lkw	#Lkws
300	6	6	1
500	10	5	2
1000	19	6-6,5	3

TABELLE 38. # Lkws bei Produktion in Pesnica für Dock 4

#Autos/Tag	#„walls“ ST hinten	FG[%]
300	21	53,6
500	40	60,7
1000	76	60,7

TABELLE 39. FG bei Teilen für Dock 4

3.4. Testdaten für Dock 4. Die Stoßdämpfer hinten sind für eine Auslagerung nach Pesnica geeignet. Der FG der Lkws ist wie erwartet nicht ganz so hoch wie bei einer Lieferung aus Messendorf, weil durch die längere Fahrzeit die Zeit zum Bereitstellen verkürzt wird. Da die Auslastung der Lkws immer noch zwischen 53,6% und 60,7% beträgt, muss nur maximal 1 Lkw mehr eingesetzt werden. Wegen der niedrigeren Produktions-, Lager- und Personalkosten ist Pesnica in diesem Fall als Standort zu bevorzugen.

#Autos/Tag	#Führen	RL/Lkw	#Lkws
300	12	6	2
500	20	5	4
1000	40	5	8

TABELLE 40. # Lkws bei Produktion in Pesnica für Dock 5

#Autos/Tag	#,„walls“ Frontend	FG[%]
300	60	62,8
500	100	62,8
1000	200	62,8

TABELLE 41. FG bei Teilen für Dock 5

3.5. Testdaten für Dock 5. Auch die Sorte Frontend sollte zumindest bis zu einer Stückzahl von 500 Autos ausgelagert werden, weil sich die Anzahl der verwendeten Lkws bis zu dieser Stückzahl nur um höchstens 2 Lkws unterscheidet und die Miet- und Personalkosten in Slowenien niedriger sind.

#Autos/Tag#Fuhren	RL/Lkw	#Lkws	
300	24	6	4
500	39	5-6	7
1000	78	6	13

TABELLE 42. # Lkws bei Produktion in Pesnica für Dock 6

#Autos/Tag	#„walls“ Rad	#„walls“ Abgas	FG[%]
300	38	12	28,3
500	62	24	35,7
1000	124	48	30,5

TABELLE 43. FG bei Teilen für Dock 6

3.6. Testdaten für Dock 6. Bei einer Produktion von ca. 300 Stück ist eine Auslagerung nach Pesnica vorzuziehen, weil nur ein Lkw mehr benötigt wird und die Personalkosten dort geringer sind. Bei einer Steigerung auf 500 Stück ist zwar der FG bei Anlieferung aus Pesnica geringfügig höher, aber die Anzahl der Lkws steigt um mehr als das Doppelte, so dass sich eine Auslagerung nicht mehr amortisiert. Bei einer Produktion um die 1000 Stück, ist das MC in Messendorf kostengünstiger.

3.7. Kostenvergleich zwischen Messendorf und Pesnica: Es wird nur der Transport jener Teile verglichen, die auch von beiden Standorten aus geliefert werden können. D.h., die Teile „Dach“ und „Cockpit“ werden hier nicht berücksichtigt. Die Anzahl der Lkws ergibt sich, indem alle Lkws, die für die Anlieferung einer Tagesproduktion zu allen Docks benötigt werden, addiert werden.

# Autos	# Lkws/Tag	GK
300	12	8860
500	16	11876
1000	28	20859

TABELLE 44. Produktion aller Teile in Messendorf

# Autos	# Lkws	GK
300	28	12197
500	46	18277
1000	89	33478

TABELLE 45. Produktion aller Teile in Pesnica

Wie schon in der vorhergehenden Detailanalyse aller Docks sieht man deutlich, dass eine Auslagerung aller Teilsorten nach Pesnica keine Kostenersparnis bringt, weil die Anzahl der benötigten Lkws um das zwei- bis dreifache höher ist als bei einer Auslagerung nach Messendorf. Hingegen ist es sinnvoll bestimmte Teilsorten mit langer Vorlaufzeit oder solche, die sehr arbeitsintensiv sind, auszulagern. Der Vorteil eines MCs in Pesnica besteht in den niedrigen Personalkosten. Die geringe Entfernung vom Werk MSF ist ein Pluspunkt des Modulcenters in Messendorf. Auch Sorten mit kurzer Vorholzeit können rechtzeitig angeliefert werden. Außerdem kann ein Lieferausfall, der beispielsweise durch einen Lkw-Unfall bedingt ist, schneller kompensiert werden.

4. Optimierungspotential

Ein Ansatzpunkt zur Optimierung sind die nicht optimal ausgelasteten Lkws. Der Grund dafür liegt hauptsächlich in den kurzen Vorlaufzeiten der Teile, die nur verlängert werden können, indem entweder die Entfernung des MCs zum Werk verkürzt wird, oder indem die Teile schon früher bereitgestellt werden, was wiederum die Flexibilität der Bestellungen einschränkt. Falls diese Maßnahmen nicht möglich sind,

müssen Teile mit sehr geringer VLZ direkt im Werk zu Modulen zusammen gebaut und falls notwendig sequenziert werden bzw. schon sequenzierte Teile müssen im Werk noch zu Modulen zusammen gebaut werden.

Durch die Anwendung von „walls“ können Lkws eingespart werden. Eine Beladung mit Hilfe von „walls“ ist nur bei hohem Füllgrad notwendig. Der Vorteil von „walls“ ist, dass sie beim Entladen leicht zuzuordnen sind, weil sie aus nur einer Sorte bestehen, und dadurch im Hauptlager Zeit gespart werden kann. Außerdem wird die Ladefläche des Lkws durch „walls“ optimal genutzt, sodass weitere Lkws eingespart werden können.

Je einheitlicher die Gebinde sind, desto leichter wird die Planung. Vor allem die Stückzahl der Gebinde sollte zumindest je Dock gleich oder im richtigen Ladeverhältnis stehen.

5. Ergebnisse

Ein Modulcenter in der Nähe des Werks ist natürlich von Vorteil, weil durch die kurze Anfahrt mehr Zeit für die Bereitstellung der verschiedenen Teile bleibt, was besonders für arbeitsintensive Teile und solche mit kurzer VLZ wichtig ist. Außerdem sind die Lkw-Kosten niedriger, weil diese mehr RL fahren können und dadurch Lkws eingespart werden. Zudem ist auch der FG meist höher, denn es bleibt mehr Zeit, um die Teile bereitzustellen. Ein höherer FG bedeutet aber auch, dass weniger Fahren zu liefern sind, also weniger Lkws eingesetzt werden müssen. Der Nachteil dieses MC ist, dass die Lager- und Personalkosten wesentlich höher sind.

Aus diesem Grund wurde betrachtet, verschiedene Teile in ein MC in einem Niedriglohnland auszulagern. Man sollte jedoch beachten, je weiter das Lager entfernt ist, desto unflexibler wird die Produktionskette. Späte Änderungen können oft nicht mehr berücksichtigt werden. Auch die Gefahr, dass es bei Lkw-Unfällen oder Pannen zu einem kurzfristigen Produktionsstillstand kommen kann, sollte berücksichtigt werden. Teile, die arbeitsintensiv sind und eine kurze VLZ besitzen, sind für eine Auslagerung nicht geeignet.

Bei diesem Projekt hat sich herausgestellt, dass der Standort Pesnica nur für bestimmte Sorten, wie „Stoßdämpfer hinten“ oder „Frontend“ rentabel ist. Durch die kurzen Vorlaufzeiten ist der FG der Lkws, die aus Pesnica liefern, meist niedriger als der von Lkws, die vom MC in Messendorf liefern, was bewirkt, dass bei einer Lieferung aus Pesnica mehr Lkws benötigt werden.

Eine Auslagerung ist daher nur für jene Sorten mit entsprechend langer VLZ oder, falls zu wenig Lagerplatz im Werk oder in einem anderen MC vorhanden ist, zu befürworten.

Erklärung der verwendeten Programmiersprachen:

1. AMPL ist die Abkürzung für „A Mathematical Programming Language“, ist eine mathematische Modellierungssprache für Lineare und Nichtlineare Optimierungsprobleme, welche an den Bell Laboratories entwickelt worden ist. CPLEX ist ein Software-Paket für Optimierungen, das nach der Programmiersprache C und der Simplex-Methode benannt ist. Es beinhaltet aber auch das Innere Punkte-Verfahren und Interfaces in Java und C++. CPLEX löst ganzzahlige Programme, sehr große lineare Programme und quadratische Programme. Es kann auch konvexe quadratische Nebenbedingungen berücksichtigen.
2. JAVA ist eine objektorientierte Programmiersprache und als solche ein eingetragenes Warenzeichen der Firma Sun Microsystems.

Abbildungsverzeichnis

1	Einstufiges Standortproblem	15
2	Rundlauf	18
3	Beladung eines Bins	33
4	Guillotineschnitt	34
5	Next Fit Algorithmus auf ein Online-Problem angewandt	39
6	First Fit Algorithmus auf ein Online-Problem angewandt	40
7	Best Fit Algorithmus auf ein Online-Problem angewandt	41
8	Vergleich eindimensionaler Offline-Algorithmen	43
9	Normierte Level	44
10	2-dimensionale Bin Packing-Strategien	46
11	2-Phasen Algorithmus	47
12	vertikale „walls“	50
13	horizontale „walls“	51
14	gemischte „walls“	51
15	Ladematrix für Dock 1 ohne VLZ	59
16	Ladematrix für Dock 3 ohne VLZ-Beschränkung	65

Tabellenverzeichnis

1	Entfernung zum slowenischen MC	6
2	Entfernungen zu ungarischen MC	7
3	Lkw-Abmessungen	12
4	Daten der zu liefernden Teile	24
5	Vergleich der Standorte	28
6	Vergleich der möglichen Rundläufe pro Arbeitstag	29
7	Gesamtkosten bei verschiedenen Füllgraden	29
8	Sorten mit kritischer VLZ	30
9	Globale Parameter für ein MC	56
10	Daten der Teile für Lieferung an Dock 1	58
11	# Lkws für Dock 1 abh. v. der Tagesproduktion	58
12	FG abhängig von der Tagesproduktion	58
13	Daten der Teile für Lieferung an Dock 2	61
14	# Lkws für Dock 2 abh. v. der Tagesproduktion	61
15	FG abhängig von der Tagesproduktion	61
16	Daten der Teile für Lieferung an Dock 3	63
17	# zu liefernder Teile für Dock 3 abh. v. der Tagesproduktion	63
18	# Lkws für Dock 3 abh. v. der Tagesproduktion	63
19	FG abhängig von der Tagesproduktion	64
20	Optimale zeitliche Beladung bei paralleler Produktion	64
21	Optimale räumliche Beladung	65
22	Daten der Teile für Lieferung an Dock 4	67
23	# Lkws für Dock 4 abh. v. der Tagesproduktion	67
24	FG abhängig von der Tagesproduktion	67
25	Daten der Teile für Lieferung an Dock 5	69
26	# Lkws für Dock 5 abh. v. der Tagesproduktion	69
27	FG abhängig von der Tagesproduktion	69
28	Daten der Teile für Lieferung an Dock 6	71
29	# Lkws für Dock 6 abh. v. der Tagesproduktion	71

	84
30 FG abhängig von der Tagesproduktion	71
31 Lieferung an Dock 6 bei zeitlicher Restriktion	72
32 # Lkws bei Produktion in Pesnica für Dock 1	73
33 FG bei Teilen für Dock 1	73
34 # Lkws bei Produktion in Pesnica für Dock 2	74
35 FG bei Teilen für Dock 2	74
36 # Lkws bei Produktion in Pesnica für Dock 3	75
37 FG bei Teilen für Dock 3	75
38 # Lkws bei Produktion in Pesnica für Dock 4	76
39 FG bei Teilen für Dock 4	76
40 # Lkws bei Produktion in Pesnica für Dock 5	77
41 FG bei Teilen für Dock 5	77
42 # Lkws bei Produktion in Pesnica für Dock 6	78
43 FG bei Teilen für Dock 6	78
44 Produktion aller Teile in Messendorf	79
45 Produktion aller Teile in Pesnica	79

Abkürzungsverzeichnis

A	gefährere km auf der Autobahn je Fahrt
abh. v.....	abhängig von
AT	Arbeitstag
B&B - Verfahren	Branch and Bound - Verfahren
BF-Alg	Best Fit - Algorithmus
BFD-Alg	Best Fit Decreasing - Algorithmus
BFDH-Alg	Best Fit Decreasing Height - Algorithmus
BL	Basislösung
BP-Problem	Bin Packing-Problem
EG	Europäische Gemeinschaft
EK	Erschließungskosten (einmalig bei Errichtung des Modulcenters)
EU	Europäische Union
FF-Alg	First Fit - Algorithmus
FFD-Alg	First Fit Decreasing- Algorithmus
FFDH-Alg	First Fit Decreasing Height- Algorithmus
FG	Füllgrad
FK	Flächenkosten
FLP	Facility location problem
FZ	Fahrzeit (in 1 Richtung)
Fzg.	Fahrzeug
GK	Gesamtkosten pro Tag
h	Stunden
HFF-Alg	Hybrid First Fit-Algorithmus
I	Inputfolge
i.Allg.	im Allgemeinen
JIS ...	Just In Sequence
JIT	Just In Time
kgV	kleinstes gemeinsames Vielfaches
L	gefährere km auf der Landstraße je Fahrt
LF	Lieferant
Lm	Lademeter
LP	Lineares Programm
LFPZ	Lieferanten-Produktionszeit
MGDU	Motor Getriebe Dress Up
min	Minuten
MIP	mixed integer programming
MSF	MAGNA STEYR Fahrzeugtechnik
MC	Modulcenters

NF-Alg	Next Fit - Algorithmus
NFD-Alg	Next Fit Decreasing - Algorithmus
NFDH-Alg	Next Fit Decreasing Height - Algorithmus
O.B.d.A.	Ohne Beschränkung der Allgemeinheit
pay	Lkwkosten für 1 Tag
PK	Personalkosten
r	Risikofaktor
RL	Rundlauf: Fahrtzeit vom MC zum Werk und retour + Be- und Entladungszeit des Lkws
stdcost	Stundensatz des Lkw-Fahrers
TPP	Transportproblem
UFLP	Uncapacitated Facility Location Problem
u.v.m.	und vieles mehr
v	durchschnittliche LKW-Geschwindigkeit auf der Land- straße
VBZ	Vorbereitungszeit im Modulcenter
VLZ	Vorlaufzeit:= vorbereitende Tätigkeiten + Lieferanten- produktionszeit + Anzahl Takte Vormontage * Taktzeit + Beladung des Lkws + Fahrzeit zum Werk + Entla- dung des Lkws + Bandbewirtschaftung + Zeitpuffer
VM	Vormontage
w	durchschnittliche LKW-Geschwindigkeit auf der Auto- bahn
z.B.	zum Beispiel

Literaturverzeichnis

- [1] Domschke, W., „*Logistik: Transport*“, Oldenbourg Verlag, München, 5. Auflage, 2007
- [2] Magna Steyr Fahrzeugtechnik Graz, <http://www.magnasteyr.com>, 2008
- [3] Baumgarten, H. et al., „*Management integrierter logistischer Netzwerke; Ein Forschungsprojekt im Auftrag der Kühne-Stiftung und der Daimler Chrysler AG*“, Paul Haupt Berne Verlag, Bern, Stuttgart, Wien, 2002
- [4] Pfohl, H.C., „*Logistiksysteme-Betriebswirtschaftliche Grundlagen*“, Springer Verlag, Berlin, 6. Auflage, 2000
- [5] Bundesministerium für Wissenschaft und Forschung 2003b NR.3, <http://archiv.bmbwk.gv.at>, 2003
- [6] REGIERUNGonline, „*Vertrag über die Europäische Union*“ (*Maastricht Vertrag*), <http://bundesrecht.juris.de>, 23.2.2008
- [7] Die Presse, „*Automultis tragen Ungarns Wirtschaft*“, <http://www.diepresse.com/home/wirtschaft/eastconomist>, 15.2.2007
- [8] Euro-Anwärter, <http://www.euro-anwaerter.de/anwaerter/ungarn.html>, 24.10.2008
- [9] Korte, B.; Vygen, J., „*Combinatorial Optimization, Theory and Algorithms*“, Springer Verlag, Berlin-Heidelberg-New York, 3. Auflage, 537-540, 2005
- [10] Fahrerhandbuch, „*Lenk- und Ruhezeiten Sozialvorschriften GO-Box Lenkeranleitung*“, 2004
- [11] Domschke, W.; Drexl, A., „*Logistik: Standorte*“, Oldenbourg Verlag, München, 1984
- [12] Kühn, A.; Hamburger, J., „A heuristic program for locating warehouses“, *Management Science* **9**: 643-666, 1963
- [13] Dyckhoff, H., „A typology of cutting and packing problems“, *European Journal of Operational Research*, 1990
- [14] Gronau, N.; Andresen, K., „*Betriebliche Anwendungssysteme, Materialwirtschaft Teil 2*“, www.wm-tagung.de, WS 2007/08
- [15] Schulte, G., „*Material- und Logistikmanagement*“, Oldenbourg Verlag, München, Wien 1996
- [16] Martello, S.; Toth, P., „*Knapsack Problems - Algorithms and Computer Implementations*“, J.Wiley, 1981
- [17] Csirik, J.; Woeginger, G., „*Online Packing and Covering Problems*“, Springer Lecture Notes in Computer Science, Band 1442, 147-177, 1998
- [18] Aho, A.; Hopcroft, J.; Ullmann, J., „*Data Structures and Algorithms*“, Addison Wesley, 1983
- [19] Baker, B., „A new proof for the First-Fit Decreasing bin-packing algorithm“, *Journal of Algorithms* **6**: 49-70, 1985
- [20] Yue, M., „*A simple proof of the inequality $FFDL(I) \leq \frac{11}{9} OPT(L) + 1, \forall L$ for the FFD bin-packing algorithm*“, Report No. 90665, Research Institute for Discrete Mathematics, University Bonn, 1990

- [21] Coffman, E.; Garey, M.; Trajan, Ph., „Performance Bounds for Level Oriented Two-Dimensional Packing Algorithms“, *SIAM Journal on Computing* **9**, 1980
- [22] Johnson, D., „*Near optimal bin packing algorithms*“, PhD thesis, MIT, Cambridge, MA, 1973
- [23] Chung, F.; Garey, M.; Johnson, D., „On Packing Two-Dimensional Bins“, *SIAM Journal on Algebraic and Discrete Methods* **3**: 66-76, 1982
- [24] Berkey, J.; Wang, P., „Two-dimensional finite bin packing algorithms“, *Journal of the Operational Research Society*, **38**: 423-429, 1987.
- [25] Mack, D.; Bortfeldt, A., „*Eine Heuristik für das mehrdimensionale Bin Packing Problem*“, Diskussionsbeitrag Nr.432, April 2008
- [26] Lodi, A.; Martello, S.; Vigo, D. , „*Recent Advances on Two-Dimensional Bin Packing Problems*“, Technical Report OR / 99 / **2**, DEIS-Università di Bologna, 1999
- [27] Lübbecke, M., <http://www.math.tu-berlin.de/luebbeck/teaching/approx08/-approx06.pdf>, WS 2006