

Entwicklung eines Dispositionsleitstandes zur Bestimmung optimaler Torbelegungen in Stückgutspeditionsanlagen

Dipl. Wirt.-Math. Annette Chmielewski

Prof. Dr.-Ing. Uwe Clausen

Lehrstuhl Verkehrssysteme und -logistik

Universität Dortmund, e-mail: chmielewski@vsl.mb.uni-dortmund.de



Im operativen Betrieb einer Stückgutspeditionsanlage entscheidet der Betriebslenker bzw. der Disponent in einem ersten Schritt darüber, an welche Tore die Fahrzeuge zur Be- und Entladung andocken sollen. Darüber hinaus muss er für jede Tour ein Zeitfenster ausweisen innerhalb dessen sie das jeweilige Tor belegt. Durch die örtliche und zeitliche Fahrzeug-Tor-Zuordnung wird der für den innerbetrieblichen Umschlagprozess erforderliche Ressourcenaufwand in Form von zu fahrenden Wegstrecken oder aber Gabelstaplerstunden bestimmt. Ein Ziel der Planungsaufgabe ist somit, die Zuordnung der Fahrzeuge an die Tore so vorzunehmen, dass dabei minimale innerbetriebliche Wegstrecken entstehen. Dies führt zu einer minimalen Anzahl an benötigten Umschlagmittelressourcen. Darüber hinaus kann es aber auch zweckmäßig sein, die Fahrzeuge möglichst früh an die Tore anzudocken. Jede Tour verfügt über einen individuellen Fahrplan, der Auskunft über den Ankunftszeitpunkt sowie den Abfahrtszeitpunkt der jeweiligen Tour von der Anlage gibt. Nur innerhalb dieses Zeitfensters darf der Disponent die Tour einem der Tore zuweisen. Geschieht die Zuweisung nicht sofort nach Ankunft in der Anlage, so muss das Fahrzeug auf einer Parkfläche warten. Eine Minimierung der Wartezeiten ist wünschenswert, damit das Gelände der Anlage möglichst nicht durch zu viele Fahrzeuge gleichzeitig belastet wird. Es kann vor allem aber auch im Hinblick auf das Reservieren der Tore für zeitkritische Touren sinnvoll sein, Fahrzeuge möglichst früh abzufertigen. Am Lehrstuhl Verkehrssysteme und -logistik (VSL) der Universität Dortmund wurde die Entscheidungssituation im Rahmen eines Forschungsprojekts bei der Stiftung Industrieforschung in Anlehnung an ein zeitdiskretes Mehrgüterflussproblem mit unsplittable flow Bedingungen modelliert. Die beiden Zielsetzungen wurden dabei in einer eindimensionalen Zielfunktion integriert. Das resultierende Mixed Integer Linear Programm (MILP) wurde programmiert und für mittlere Szenarien durch Eingabe in den Optimization Solver CPLEX mit dem dort implementierten exakten Branch-and-Cut Verfahren gelöst. Parallel wurde im Rahmen einer Kooperation zwischen dem Lehrstuhl VSL und dem Unternehmen hafa Docking Systems, einem der weltweit führenden Tor- und Rampenhersteller, für die gleiche Planungsaufgabe ein heuristisches Scheduling Verfahren sowie ein Dispositionsleitstand namens LoadDock Navigation entwickelt. Der Dispositionsleitstand dient der optimalen Steuerung der Torbelegungen in logistischen Anlagen. In dem Leitstand wird planerische Intelligenz in Form des heuristischen Schedulingverfahrens, technische Neuerungen in der Rampentechnik in Form von Sensoren und das Expertenwissen des Disponenten

in einem Tool verbunden. Das mathematische Modell sowie der Prototyp mit der integrierten Heuristik werden im Rahmen dieses Artikels vorgestellt.

Allocating arriving trucks to doors for charging or discharging is one of the operative tasks in a freight forwarding terminal. In addition the planer also has to reserve a suitable time slot for each truck at the allocated door. This two-dimensional planning task effects the amount of the resulting distances for the transshipment of all load units between the inbound doors and the outbound doors. Therefore, one objective of the planning task is to find an optimal allocation that leads to minimal total distances and a minimal number of resources needed in operations. A second objective is the minimization of waiting times. Trucks should be allocated to a door as soon as possible after their arrival in the terminal. Each truck has an individual time table indicating the earliest arrival time and the latest departure time form the terminal. The planer has to reserve a time slot within this period of time that is long enough for (dis)charging the booked number of load units. In case a truck is not allocated right after its arrival, the driver has to wait on a parking space until he gets further information. Therefore, minimizing waiting times leads to less crowded yards. In addition to this, trucks should be charged and discharged as soon as possible to reserve doors for time critical or very late trucks. A mathematical model based on time discrete multicommodity flow problems with side constraints was developed for the described planning task at the chair of transport and logistics (University of Dortmund). The resulting mixed integer linear programm (MILP) was programmed with the optimization solver CPLEX and different test scenarios were applied to the Branch-and-Cut algorithm implemented in CPLEX. In addition, a heuristic scheduling method and a yard management tool named LoadDock Navigation were developed in a cooperation project with hafa docking systems, one of the leading door and ramp producer. The tool supports a planer when developing optimal plans for the door allocation of all currently known trucks of a certain day. The tool combines scientific new planning methods, technical innovations as for example sensors in the ramps indicating the current status of all doors in the terminal as well as the expert knowledge of the planer.

1 Logistischer Hintergrund

Kernelement einer Stückgutspeditionsanlage ist die Umschlaghalle. Dies ist ein Gebäude einer bestimmten Form (z. B. I-Shape, T-Shape, L-Shape), an dessen Außenwänden eine definierte Anzahl an Toren angeordnet ist:

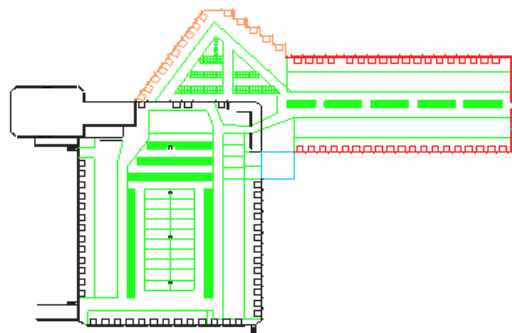
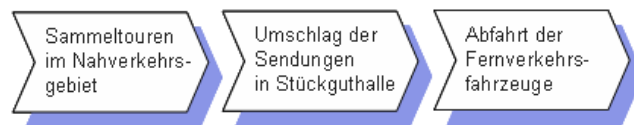


Abb. 1: Layout einer Stückguthalle mit L-Shape

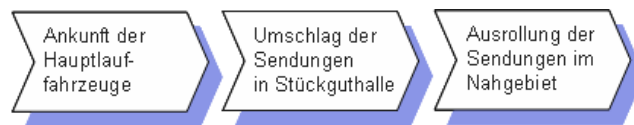
Man unterscheidet Entladetore, Beladetore und Multifunktionsstore, an welchen beide logistischen Funktionen durchgeführt werden können. Die Einteilung der Tore in Entlade- und Beladetore kann im Rahmen einer Prozessplanung vor Inbetriebnahme der Halle festgelegt worden sein. Es ist aber auch möglich, dass dies technische Ursachen wie z. B. die Rampenhöhe der Tore hat. Jeder Stückgutanlage ist eine Nahverkehrsregion zugeordnet. Die pro

Tag anfallenden Transportaufträge (Sendungen) der in dieser Region ansässigen Verloader werden durch Nahverkehrstouren eingesammelt (Vorlauf). Die beladenen LKW docken nach Eintreffen in der Anlage an den zugewiesenen Toren an. Die Sendungen werden entladen und innerbetrieblich zu denjenigen Toren transportiert, an denen die entsprechenden Fahrzeuge für die Anschlussrelation der Sendungen warten. Bei der Zuweisung an die Tore gilt es die Fahrpläne (Ankunfts- und Abfahrtszeitpunkte) der Fern- und der Nahverkehrstouren zu beachten. Anschließend werden die gebündelten Sendungsmengen einer jeden Fernrelation zielrein im Hauptlauf zu derjenigen Anlage transportiert, in deren Nahverkehrsregion wiederum die Empfänger der Sendungen ansässig sind. Somit ist ein erneuter Umschlag in den Empfangsanlagen auf Nahverkehrsfahrzeuge zur Feinverteilung der Sendungen im Raum nötig (Nachlauf). Insgesamt existieren für jede der Anlagen zwei Zeitspannen innerhalb der täglich produziert wird [Lublow]:

- **Sammelgutausgang (kurz: SA):**
Hiermit ist das Sammeln der Sendungen im Vorlauf und der Umschlag von den Nahverkehrstouren auf die abgehenden Fernverkehrstouren gemeint, auch als Nahverkehrseingang und Fernverkehrgang bezeichnet (Zeitspanne: ca. 12.00 - 20.00).



- **Sammelguteingang (kurz: SE)**
Hierunter versteht man allgemein den Umschlag der Sendungen von den ankommenden Fernverkehrsfahrzeugen auf die Nahverkehrsfahrzeuge, d. h. den Fernverkehrseingang und Nahverkehrgang und die Feinverteilung im Raum (Zeitspanne: ca. 00.00 - 12.00).



Für den innerbetrieblichen Transport der Sendungen zwischen den Toren und den Prozessflächen (Entladeflächen und Bereitstellflächen für die abgehenden Relationen) werden hauptsächlich diskrete Umschlagmittel z. B. Gabelstapler und Handgabelhubwagen eingesetzt. Diese müssen von entsprechendem Personal bedient werden, wodurch die Handlings- und Umschlagaktivitäten innerhalb der Halle einer Stückgutpeditionsanlage sehr kostenintensiv sind. Eine Alternative hierzu ist der Stetigförderer Schleppkette, welche jedoch nur in einem geringen Prozentsatz der Anlagen Anwendung findet. Aufgrund der Aufteilung eines Verkehrstages in die zwei Zeitspannen Sammelguteingang und Sammelgutausgang, ist die Auslastung einer Stückgutanlage im zeitlichen Verlauf nicht ausgeglichen:

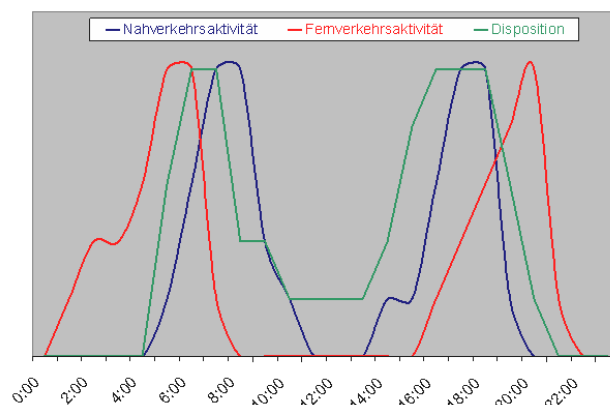


Abb. 2: Schematische Darstellung: Auslastung einer Stückgutanlage im zeitlichen Verlauf

Eine Steuerungsmöglichkeit, die die Effizienz des Umschlags und die entstehenden Betriebskosten entscheidend beeinflusst, ist die Torbelegung durch ankommende und abgehende Fahrzeuge. Hierbei müssen die beladenen Fahrzeuge (Quellen von innerbetrieblichen Transportprozessen) Toren örtlich und zeitlich zugeordnet werden. Gleiches geschieht mit den zu beladenden Fahrzeugen, den Senken innerbetrieblicher Transportprozesse. In der Praxis gestaltet sich diese Zuordnung so, dass für die abgehenden Fahrzeuge Schilder über den Toren angebracht sind, auf denen die Nummer derjenigen Relation vermerkt ist, die über das Tor abgewickelt wird. Darüberhinaus ist eine bestimmte Anzahl an Toren als Eingangsbereich definiert, denen die ankommenden Fahrzeug dynamisch zugewiesen werden. Je nach Betreiber einer Anlage kann diese Zuordnung für einen definierten Zeitraum fix sein oder aber regelmäßig - z. B. in einem monatlichen Rhythmus - umgestellt werden. In einigen Fällen wird die Zuordnung der Touren zu Toren auch dynamisch jeden Tag entschieden. Vor allem, wenn ein Wechsel der Nahverkehrstoureneinteilung oder aber der Verlust oder Gewinn von Großkunden ansteht, scheint eine Überprüfung der Torbelegungen durch die Touren und Relationen im System zweckmäßig. Durch die Zuordnung der Fahrzeuge zu den Toren wird neben der Gesamtbelastung der innerbetrieblichen Ressourcen (Flächen und Umschlagmittel) auch die Stärke der Belastung je Zeiteinheit mitbestimmt. Eine geschickte Steuerung des Andockverhaltens der Fahrzeuge kann hier zu einer Entzerrung der Spitzenzeiten und somit zu einer gleichmäßigeren Auslastung der Ressourcen führen.

2 Stand der Forschung und der Technik

Es gibt derzeit wenige Stückgutspediteure, die softwaregestützte Systeme zur Steuerung der Ressourcen und der Prozesse in ihren Anlagen im Einsatz haben. Einige Anlagenbetreiber verfügen über so genannte Dispositionsleitstände. In diesem Fall werden ein oder zwei Mitarbeiter (Disponenten) abgestellt, die die ankommenden Fahrzeuge den Toren zuweisen. Die Mitarbeiter können entweder direkt beim Pförtner platziert sein oder aber einen eigenen Raum in der Umschlaghalle belegen. Die von ihnen genutzten Planungsinstrumente sind

- eine Funkverbindung zum Pförtner und zum Hallenmeister, über die sie Informationen bezüglich ankommender Fahrzeuge (Tourenummer, Ladungsmenge etc.) und der Situation innerhalb der Halle (Auslastung der Teams und Ressourcen) abgleichen können
- ein Kamerasysteme, welches auf dem Hof der Anlage installiert ist und dessen Einstellung (Blickrichtung und Zoom) manuell bedient werden kann. Hierüber können die Disponenten Informationen über freie und belegte Tore erhalten, was aufgrund der Größe der Logistikimmobilien nicht sofort ersichtlich ist
- eine Bildschirmmaske, auf der das Layout der Halle und die Tore angezeigt werden und über die mittels Tastatureingabe nachgehalten werden kann, welche Fahrzeuge oder Wechselbrücken an welche Toren von den Disponenten angewiesen wurden.

Die aktuellen Dispositionsleitstände dienen somit hauptsächlich dazu, den aktuellen Zustand in der Anlage zu erfassen und zu visualisieren. Die Entscheidungen "Fahrzeug an Tor" bzw. zunächst "Wartezeit auf einer Parkfläche" trifft der menschliche Experte. Vorschläge zur optimalen Steuerung und Disposition werden nicht durch Planungszintelligenz in Form von Algorithmen oder Softwaretools geboten. Von Seiten der Wissenschaft wurde dieser Missstand bereits erkannt. So erarbeitete [Lublow] ein Konzept für einen Speditionsleitstand in einer Stückgutspeditionsanlage. Sein Schwerpunkt liegt auf der Ableitung von Anforderungen an den Informationsbedarf und die Funktionen eines solchen Leitstandes sowie einer Kosten- und Nutzenanalyse. [Gue2] untersucht die beiden Dispositionsvarianten: Zuweisung der wartenden LKW an Tore nach der Devise "First-come-first-serve" oder "je nach geladenem Sendungsmix (Aufteilung der Lademengen auf die Fernrelationen)". Dabei bewertet er die Ergebnisse der Dispositionsvarianten über die Summe der resultierenden innerbetrieblichen Transportwege. Dies ist ein erster Schritt in Richtung einer Planungszintelligenz. Ein Ansatz, der das geschilderte Problem algorithmisch beschreibt stammt von [Bermudez]. Hier wird mit Hilfe eines genetischen Algorithmus eine Zuweisung der Fahrzeuge an Tore erarbeitet. Der Ansatz beruht allerdings auf einigen praxisfremden Annahmen wie z. B., dass an einem Tor im Planungszeitraum nur jeweils eine Tour andocken kann, was zumindest für den

Eingangsbereich in Stückgutanlagen nicht zutrifft. Fahrpläne werden ebenso wie Ressourcenkapazitäten nicht berücksichtigt. Außerdem werden die innerbetrieblichen Entfernungen für die entstehenden Transporte rein monokriteriell minimiert. Eine zweite Zielsetzung, wie z. B. die Minimierung von Wartezeiten der Fahrzeuge, wird nicht integriert.

Im vorliegenden Artikel wird das Planungsproblem der Entwicklung optimaler Torbelegungen in Stückgutanlagen mit allen praxisrelevanten Eigenschaften und Randbedingungen mathematisch modelliert. Dies geschieht in Anlehnung an zeitdiskrete Mehrgüterflussprobleme, die um zusätzliche Nebenbedingungen ergänzt werden (Kapitel 3). Der Aufbau des Flussmodells in Abhängigkeit eines beliebigen Eingabeszenarios wurde in Visual Basic programmiert und das resultierende Optimierungsmodell an CPLEX zur Lösung mit einem dort implementierten Branch-and-Cut Verfahren übergeben. Ein Test mit verschiedenen Probleminstanzen hat gezeigt, dass bereits bei mittleren Problemgrößen eine exakte Lösung über CPLEX zu lange Rechenzeiten erfordert. Daher wurde im Rahmen der seit Juli 2005 laufenden Kooperation zwischen dem führenden Tor- und Rampenhersteller hafa Docking Systems und dem Lehrstuhl Verkehrssysteme und -logistik zusätzlich ein heuristisches Schedulingverfahren entwickelt, welches die gleiche Planungsaufgabe löst (Kapitel 4). Das Schedulingverfahren wurde in einem ebenfalls gemeinsam entwickelten Prototypen für einen Dispositionsleitstand integriert, der den Disponenten einer Anlage bei der Entwicklung optimaler Torbelegungspläne und deren dynamischer Anpassung unterstützen soll (Kapitel 5). Dieser wurde im Oktober 2005 auf dem BVL-Kongress in Berlin vorgestellt.

3 Mathematische Modellierung der Planungsaufgabe

Die gestellte Planungsaufgabe wird zunächst für den Fall des Sammelgutausgangs als zeitdiskretes Mehrgüterflussproblem mit zusätzlichen Nebenbedingungen formuliert. Hierfür werden in einem ersten Schritt die relevanten Objekte aus dem logistischen System und ihre Eigenschaften eingeführt und mittels mathematischer Notationen modelliert.

3.1 Modellierung der relevanten Objekte und ihrer Eigenschaften

Informationen zu den Nahverkehrstouren und Fernrelationen:

Die Menge aller Nahverkehrstouren im System wird mit $K = \{1, \dots, K'\}$ angegeben. Bezüglich der Fernverkehrstouren gilt, dass alle Touren, die die gleiche Fernrelation bedienen über ein Tor abgefertigt werden. Grund hierfür ist, dass alle Sendungen, die das gleiche Hauptlaufziel haben und somit der gleichen Fernverkehrsrelation zugeordnet sind, nach der Entladung aus den ankommenden Nahverkehrsfahrzeugen gemeinsam auf einer Bereitstellfläche gesammelt werden. Diese Flächen sind üblicherweise genau einem Tor zugeordnet. Somit werden hier nicht die einzelnen Ferntouren betrachtet, sondern die komplette Relation, unabhängig davon, ob diese mit einem oder mehreren Fahrzeugen bzw. Touren gefahren wird. Die Menge aller Fernrelationen wird mit $L = \{1, \dots, L'\}$ beschrieben. Bezüglich jeder Nahverkehrstour $k \in K$ und jeder Fernverkehrsrelation $l \in L$ sind die folgenden Informationen relevant:

- Fahrplan: erwartete Ankunftszeit auf dem Hof sowie spätest mögliche Abfahrtszeit
- Sendungsmengen: geladene bzw. zu erhaltende Sendungsmengen, die in Ladeeinheiten¹ - kurz LE - gemessen werden.
- Sendungsmix: Anzahl an LE, die von einer Nahverkehrstour zu den jeweiligen Fernverkehrsrelationen umgeschlagen werden

Die oben geschilderten Informationen lassen sich wie folgt mathematisch abbilden:

w^k Anzahl an LE, die Nahtour k geladen hat ($w^k \in \mathbb{N}$)

v^l Anzahl an LE, die die Fernrelation l insgesamt erhält ($v^l \in \mathbb{N}$).

d_{kl} Menge aller LE von Nahtour k , die auf Fernrelation l gebucht sind ($d_{kl} \in \mathbb{N}$)

¹Unter LE werden i.d.R. einzelne Paletten verstanden, auf denen im Stückgutumschlag üblicherweise die Sendungen gelagert sind.

- a_k Ankunftszeitpunkt von Nahtour k auf dem Hof
- b_k spätest möglicher Abfahrtszeitpunkt der Nahtour k vom Tor
- a_l Bereitstellzeitpunkt der Fernrelation l
- b_l späteste Abfahrtszeit der letzten Tour der Fernrelation l

Kommt ein Fahrzeug z. B. um 12:00 in der Anlage an, so kann es nicht direkt um 12:00 bereits an einem der Tore stehen. Es muss ein durchschnittlicher Aufschlag für das Rangieren erfolgen. Ebenso kann ein Fahrzeug, das um 17:00 Uhr beispielsweise spätestens den Hof wieder verlassen haben muss, nicht bis 17:00 Uhr am Tor stehen. Diese Transformationen der Zeitpunkte wird im Folgenden o.B.d.A. als bereits vorgenommen angesehen. Wird also vom Ankunftszeitpunkt a_k gesprochen, so ist dies bereits der frühest mögliche Andockzeitpunkt der Nahtour k an einem der Tore.

Informationen zum Layout der Stückguthalle:

Das Layout der zugrunde liegenden Halle muss in den Grundzügen erfasst werden. Für die Planungsaufgabe Entwicklung optimaler Torbelegungspläne bedeutet dies, dass zum einen die Anzahl der Tore sowie deren jeweilige logistische Funktion - Entladung, Beladung, Multifunktion - gegeben sein muss. Zusätzlich muss die Entfernung zwischen allen Toren innerhalb der Halle gemessen werden. Hierbei sollten die realen Längen der Verkehrswege für die Umschlagmittel zur innerbetrieblichen Verbringung in der Halle verwendet werden. Die Layoutinformationen können wie folgt mathematisch abgebildet werden:

- I Anzahl der reinen Entladetore ($I \in \mathbb{N}$)
- J Anzahl der reinen Beladetore ($J \in \mathbb{N}$)
- M Anzahl der Multifunktionstore ($M \in \mathbb{N}$)
- d_{ij} Entfernung [km] zwischen Tor i und j ($i \in I \cup M, j \in M \cup J$) mit ($d_{ij} \in \mathbb{R}^+$)

Als gültige Zuordnung für eine Quelle, d. h. eine Nahverkehrstour, kommen nur Entlade- oder Mischstore in Frage. Ebenso können die Senken, d. h. die Fernverkehrsrelationen, nur Misch- oder Beladetoren zugeordnet werden.

Informationen zu den Umschlagmitteln in der Halle:

Es wird in diesem Modell zunächst nur der reine Transportprozess innerhalb der Halle zwischen den Toren formuliert. Dieser geschieht vereinfachend angenommen mit Hilfe einer homogenen Umschlagmittelflotte, die durch Kosten, Geschwindigkeit und der Anzahl beschrieben werden kann. Die Kapazität je Umschlagmittel beträgt eine LE:

- r Anzahl der Umschlagmittel ($r \in \mathbb{N}$)
- g Durchschnittsgeschwindigkeit ($g \in \mathbb{R}^+$) [km/h]
- c Kosten ($c \in \mathbb{R}^+$) [Euro/h]
- e Prozesszeit Entladung ($e \in \mathbb{R}^+$) [min/LE],
(Fahrt in das Fahrzeug, Aufnahme der LE, Fahrt bis zum Tor)
- b Prozesszeit Beladung ($b \in \mathbb{R}^+$) [min/LE]

Zeitdiskretisierung:

Die Aufgabe des Disponenten liegt nicht nur darin, die Touren den Toren örtlich zuzuordnen, sondern auch ein Zeitfenster zu bestimmen, innerhalb dessen die Touren die Tore belegen. Da eine minutengenaue Betrachtung zu einer zu hohen Komplexität führen würde, wird im vorliegenden Modell eine Diskretisierung der Zeit vorgenommen. Hierfür werden einzelne Zeitscheiben eingeführt, die den Optimierungszeitraum in äquidistante Zeitintervalle unterteilen. Anstatt somit einzelne Zeitpunkte zu betrachten, werden punktgenaue Zeitereignisse (Andocken, Abdocken etc.) eindeutig einer Zeitscheibe zugeordnet und die zutreffenden Entscheidungen nur bezogen auf die betrachteten Zeitscheiben gefällt. Der Startzeitpunkt 0 bezeichnet den aus dem realen Start der Verkehrswelle Sammelgutausgang transferierten Beginn des Optimierungszeitraums im mathematischen Modell (z. B. 0=12:00). Das Ende des Optimierungszeitraums im Modell ist durch T gegeben (z. B. $T=20:00$). Nimmt man nun eine Zeitscheibenlänge von q Minuten an, so ergeben sich $T' = \frac{T}{q}$ gleichlange Zeitscheiben (ZS=Zeitscheibe), die den Optimierungszeitraum zerteilen. Die Menge aller Zeitscheiben sei im Folgenden durch $T = \{1, \dots, T'\}$ gegeben. Es sei zusätzlich eine Funktion d gegeben, die die Zeitpunkte in Zeitscheiben eindeutig abbildet: $d: [0; T] \rightarrow \bigcup_{t=1}^{T'} t$, z. B. $d(a^k) = t_5$.

3.2 Optimierungsmodell

Es wird nun zunächst erläutert, wie das Mehrgüterflussnetzwerk zur Darstellung der Entscheidungssituation optimale Torbelegung im SA unter Verwendung der beschriebenen Objekte und Daten aufgebaut wird. Anschließend werden basierend auf dem erstellten Netzwerk die Entscheidungsvariablen, Nebenbedingungsfunktionen und die Zielfunktion entwickelt.

3.2.1 Netzwerkaufbau

Zur Verdeutlichung des Vorgehens beim Netzwerkaufbau werden die wesentlichen Schritte, d. h. die Definition der Knotenmenge und der Kantenmenge anhand eines Beispielszenarios in Abb. 3 erklärend dargestellt.

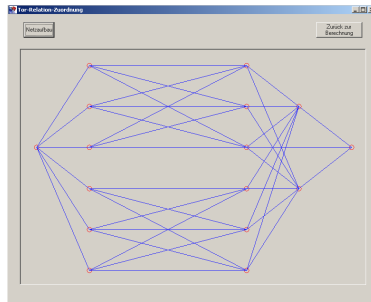


Abb. 3: Modellierung der Entscheidungssituation im SA als zeitdiskretes Mehrgüterflussproblem

Definition der Knotenmenge:

Die K' Nahtouren werden als Güter aufgefasst, die in einer imaginären Quelle Q mit bestimmten Angeboten auftreten. Die erste Knotenebene V_1 nach der Quelle stellen die in der Anlage vorhandenen Nah- und Mischtor $I \cup M$ dar, über die die Güter k in die Halle einfließen können. Dabei gilt, dass für jede der Zeitscheiben t eine Duplikation dieser Knoten stattfindet, um so den Zeitaspekt der Entscheidung zu berücksichtigen. Im obigen Beispiel existieren drei Eingangstore und zwei Zeitscheiben. Die Knoten der zweiten Ebene V_2 sind die für die Beladung der Fernrelationen zulässigen Misch- und Ferntor $M \cup J$. Im Beispiel existieren drei Ausgangstore. Grundsätzlich sind alle Tore vollverknüpft, da eine Ladeeinheit einer Nahtour alle möglichen Fernrelationen des Stückgutnetzes erreichen können soll. Ein Transport von einem Mischtor i in der Knotenebene V_1 zu demselben Mischtor i in der Ebene V_2 soll verboten werden, was in der späteren Entfernungsmatrix durch extrem hohe Werte für diese Verbindungen gewährleistet wird. Die Knoten der letzten Ebene V_3 sind die Fernrelationen im System (im Beispiel sind dies zwei Stück). Diese sind über Kanten mit allen Ausgangstoren einer ZS der vorgelagerten Knotenebene verbunden insofern die jeweilige Zeitscheibe für eine Beladung zulässig ist. Müsste die erste Fernrelation in Abb. 3 beispielsweise früher vom Hof abfahren und dürfte sie folglich in der letzten Zeitscheibe keine Güter mehr erhalten, so wären die entsprechenden Knoten (Ausgangstore) auch nicht durch Kanten mit dem die Fernrelation repräsentierenden Knoten verbunden. Das Netzwerk schließt eine imaginäre Senke S ab, die durch eine Rückkante mit der Quelle verbunden ist. Es gilt, dass die Menge aller Knoten im Netzwerk durch $V = Q \cup \left(\bigcup_{i=1}^3 V_i \right) \cup S$ und die Anzahl aller Knoten durch $V' = |V|$ gegeben sind. Im obigen Beispiel sind dies sechzehn Knoten.

Definition der Kantenmenge:

Zwischen den Knoten der jeweiligen Ebenen befinden sich gerichtete Kanten. Der Fluss der Güter k ist hierbei von der Quelle zur Senke, d. h. von links nach rechts gerichtet. Natürlich entspricht der Aufbau des Netzwerks nicht dem dahinter liegenden realen Layout und den dortigen Transportrichtungen. Jedes Layout ist lediglich nach den hier genannten Vorschriften in ein rechtsgerichtetes Netzwerk überführbar. Die Kanten lassen sich ähnlich wie die Knoten in verschiedene Ebenen einteilen und sind hierdurch einzeln adressierbar. Des Weiteren wird jede Kante arc_i durch minimale Kapazitäten ($arc_i^{cap_{min}}$), maximale Kapazitäten

($arc_i^{cap_{max}}$) und einer Länge bzw. Kosten arc_i^{laenge} in [km] beschrieben.

Die erste Kantenmenge oder -ebene, bezeichnet durch A_1 , besteht aus den Verbindungen des Quellknotens mit jedem der Knoten der ersten Knotenmenge V_1 , d. h. mit jedem Nah- bzw. Mischtor in den Zeitscheiben des Systems. Alle Kanten haben als maximale Kapazität die maximale Entladeleistung je Tor und Zeitscheibe. Diese wird in Anzahl an LE gemessen und errechnet sich aus der Zeitscheibenlänge q , die durch die Entladedauer je LE e geteilt und auf die nächste ganze Zahl abgerundet ($\lceil q/e \rceil$) wird. Als minimale Kapazität erhalten die Kanten dieser Menge die 0. Die Längen der Kanten sind grundsätzlich gleich Null, da sie keine der innerbetrieblichen Umschlagressourcen beanspruchen und nur Zuordnungsentscheidungen zu Toren und Zeitscheiben repräsentieren. Die Kantenmenge A_2 besteht aus allen möglichen Verbindungen zwischen den Tore der ersten Knotenebene und denen der zweiten. Da jede Nahtour alle Fernrelationen erreichen können soll, besteht eine Vollverknüpfung. Die maximale Kapazität der Verbindungskanten kann auf einen sinnvollen Wert akt gesetzt werden, damit nicht zuviel Verkehr über einen Verkehrsweg der Halle je Zeitscheibe fließt. Die minimale Kapazität beträgt 0. Die Länge der Kanten entspricht der tatsächlichen Entfernung zwischen den Toren in [km]. Die Kantenmenge A_3 stellt alle Verbindungen zwischen den Misch- und Ferntoren und den Fernrelationen, bereits bereinigt um zeitlich nicht zulässige Verbindungen, dar. Dabei bezeichnet $d(a^l)$ die frühest mögliche Zeitscheibe für eine Beladung der Fernrelation l und $d(b^l)$ die spätest mögliche Zeitscheibe. Die maximale Kapazität einer jeden Kante aus dieser Menge ist gleich der Beladeleistung je Tor ($\lceil q/b \rceil$). Minimale Kapazität und Länge der Kanten sind gleich 0. Die Menge A_4 verbindet alle Fernrelationen mit der Senke S im System. Die maximale Kapazität ist demnach gleich der Lademenge v^l der Fernrelationen, die minimale Kapazität und die Länge der Kanten gleich 0. Um einen Fluss von der Quelle zur Senke zu erreichen, wird noch eine Rückkante eingeführt. Es gilt, dass die Menge aller Kanten im Netzwerk durch $A = \bigcup_{i=1}^4 A_i \cup \vec{QS}$ und die Anzahl aller Kanten durch A' gegeben sind. In obigem Beispiel existieren 39 Kanten, was drauf hinweist, dass es bereits bei kleinen Szenarien zu einer hohen Anzahl an Knoten und Kanten kommen kann.

3.2.2 Entscheidungsvariablen

Für obiges Netz muss nun für jede Kante arc_i mit $i \in A$ entschieden werden, wieviele LE der einzelnen Güter k über sie fließen sollen. Die Entscheidungsvariablen im Rahmen der Planungsaufgabe optimale Torbelegung für den SA haben daher folgende Gestalt:

$$x_{arc_i}^k \quad \forall i \in A, \forall k \in K \quad (1)$$

Da es sich um LE handelt, die somit nur als Ganzes transportiert und gehandelt werden können, gilt, dass $x_{arc_i}^k \in \mathbb{N}$ ist.

Obiges Mehrgüterflussnetzwerk reicht nicht aus, um die komplette Entscheidungssituation mit allen erforderlichen Nebenbedingungen, die im Rahmen einer optimalen Torbelegung in Stückgutanlagen zu beachten sind, abzubilden. Die Anforderung z. B., dass die LE einer Nahtour k nur durch ein und dasselbe Tor i in das System eintreten können, weil Fahrzeuge zwischen den Toren nicht umgesetzt werden, ist über obige Formulierung nicht gewährleistet. Zur Integration dieser Anforderungen werden bei der folgenden Modellierung neben der Zielfunktion noch weitere Nebenbedingungen formuliert, die das Netzwerk ergänzen. Dadurch verliert es seine reine graphentheoretische Natur und bewegt sich in Richtung eines Mixed Integer Linear Programms (MILP)³.

3.2.3 Nebenbedingungen (NB)

Die erforderlichen Nebenbedingungen werden nun in Form von mathematischen Funktionen in Abhängigkeit der Entscheidungsvariablen $x_{arc_i}^k$ formuliert.

²[.] ist die Gaußklammer.

³Es wird vereinfachend angenommen, dass die Entscheidungsvariablen der Flüsse $x_{arc_i}^k$ stetig sind. Es handelt sich um ein dynamisches System, bei dem am Ende einer ZS ein Transportvorgang nicht abgeschlossen sein muss.

NB 1: Eine Nahtour muss an einem Tor andocken und darf nur über ein und dasselbe Tor entladen werden

Falls über eine Kante arc_i , die auf ein Tor $j \in I \cup M$ verweist, in einer der ZS t ein positiver Fluss $x_{arc_i}^k$ eines Stoffes k läuft (Menge $\bigcup_{t=1}^{T'} A_{1t}^j$), so müssen sämtliche Entscheidungsvariablen für alle anderen Kantenmengen, die nicht das gleiche Tor referenzieren (Menge $\bigcup_{t=1}^{T'} A_{1t}^{j'}$ mit $j' \neq j$) gleich Null sein. Um dies zu garantieren wird eine binäre Entscheidungsvariable δ_k^j eingeführt, die überprüft, ob ein positiver Fluss von k über ein Tor j in einer der ZS t stattfindet:

$$w^k * \delta_k^j \geq \sum_{i \in \bigcup_{t=1}^{T'} A_{1t}^j} x_{arc_i}^k \quad (2)$$

$$\forall k \in K, \forall j \in I \cup M$$

Zusätzlich gilt, dass die binären Entscheidungsvariablen δ_k^j für eine Nahtour k für genau ein Tor j gleich Eins sein müssen:

$$\sum_{j=1}^{I'+M'} \delta_k^j = 1 \quad (3)$$

$$\forall k \in K$$

Hieraus folgt, dass die verbleibenden $x_{arc_i}^k$ für ein k somit auch gleich Null sind, falls sie nicht das gleiche Tor j in einer der ZS t bezeichnen.

NB 2: Eine Fernrelation muss einem Tor zugewiesen werden und darf nur über ein und dasselbe Tor beladen werden

Gleiches gilt für alle Fernrelationen, was durch die Einführung der binären Variablen θ_l^j (mit $j \in M \cup J$ und $l \in L$) und folgende Nebenbedingungen garantiert wird:

$$v^l * \theta_l^j \geq \sum_{i \in A_{3i}^j} x_{arc_i}^k \quad (4)$$

$$\forall l \in L, \forall j \in M \cup J$$

$$\sum_{j=1}^{M'+J'} \theta_l^j = 1 \quad (5)$$

$$\forall l \in L$$

NB 3: Ein Tor kann nur durch maximal eine Fernrelation benutzt werden

Ist θ_l^j für eine Relation l gleich Eins, so kann für das gleiche Tor j nicht auch noch eine andere Variable $\theta_{l'}^j$ mit $l \neq l'$ gleich Eins sein:

$$\sum_{l=1}^{L'} \theta_l^j \leq 1 \quad (6)$$

$$\forall j \in M \cup J$$

Dies liegt darin begründet, dass die Fahrzeuge des Fernverkehrs sukzessive beladen und die LE an einem bestimmten Tor bereitgestellt werden. Dies muss möglichst "relationsrein" geschehen, damit es zu keinen Fehlverladungen kommt. Anders als bei den Nahtouren werden Ausgangstore also durch maximal eine Relation belegt.

NB 4: Nahtouren müssen ohne Unterbrechung durch andere Touren an einem Tor stehen

Eine Nahtour k soll nicht in einer beliebigen ZS t und in einer der darauffolgenden ZS $t + j$ mit $j = 2, \dots, T' - t$ an einem Tor i andocken ohne dazwischen auch das Tor zu belegen. Dies würde bedeuten, dass das Fahrzeug umgesetzt und später wieder an das Tor herangefahren wird, was in der Praxis unüblich ist. Um zu überprüfen, wann eine Tour k andockt, d. h. ein positiver Fluss über eine der Kanten der ersten Ebene innerhalb einer ZS t fließt, wird eine neue binäre Variable γ_t^k eingeführt:

$$\sum_{i \in A_{1t}} x_{arc_i}^k \leq w^k * \gamma_t^k \quad (7)$$

$$\sum_{i \in A_{1t}} x_{arc_i}^k \geq \gamma_t^k \quad (8)$$

$$\forall k \in K, \forall t \in T$$

Folgende Muster für ein k an irgendeiner Stelle innerhalb des γ -Vektors sollen folglich ausgeschlossen werden: $1|0|1$, $1|0|0|1$, $1|0|0|0|1$ etc. Wieviele Muster unterschiedlicher Länge überprüft werden müssen hängt von der Anzahl der ZS T' im System ab. Bei $T' = 5$ gibt es beispielsweise drei Muster des Typs $1|0|1$, zwei Muster des Typs $1|0|0|1$ und nur ein Muster des Typs $1|0|0|0|1$. Unabhängig von der Länge des betrachteten Musters gilt insgesamt, dass die Summe aus den beiden äußeren Elementen, verringert um die aufaddierten inneren Elemente, d. h. die dazwischen liegenden, immer kleiner oder maximal gleich 1 sein muss. Bei dem Muster $1|0|0|1$, welches nicht erlaubt ist, führt diese Rechnung z. B. zu einer 2. Das Muster $1|1|1|1$ hingegen ergibt eine Null und ist ja auch erlaubt. Des Weiteren sind natürlich auch Muster wie z. B. $1|0|1|0|0|1$ nicht erlaubt. Diese werden durch obige Summenregel nicht erfasst. Allerdings handelt es sich hierbei um zusammen gesetztes Muster. Das Muster $1|0|1|0|0|1$ besteht aus den Mustern $1|0|1$ und $1|0|0|1$, die ja beide schon einzeln unterdrückt wurden. Man kann die Nichterfassung der zusammengesetzten Muster somit vernachlässigen und es gilt:

$$\gamma_t^k + \gamma_{t+i}^k - \sum_{j=t+1}^{t+i-1} \gamma_j^k \leq 1 \quad (9)$$

$$\forall k \in K,$$

$$\forall i \in \{2, \dots, T' - 1\}, \forall t \in \{1, \dots, T' - i\}$$

NB 5: Beachtung der frühest- und spätestmöglichen Andockzeitpunkte je Nahtour

Eine Nahtour k kann nicht in einer Zeitscheibe t andocken, die kleiner als $d(a^k)$ ist. Durch $d(a^k)$ wird die ZS bezeichnet, in der der frühest mögliche Andockzeitpunkt a^k von Nahtour k liegt. Gleiches gilt für die spätest mögliche Andockzeit b^k , d. h. in einer ZS nach $d(b^k)$ darf ebenfalls kein positiver Fluss von k über eine der Kanten in der Menge A_1 herrschen.

$$\sum_{t=1}^{d(a^k)-1} \gamma_t^k = 0 \quad (10)$$

$$\sum_{t=d(b^k)+1}^{T'} \gamma_t^k = 0 \quad (11)$$

$$\forall k \in K$$

Hierdurch werden in Kombination mit NB 4 die entsprechenden Werte $x_{arc_i}^k$ auf Null gedrückt.

NB 6: Einhaltung des Verhältnisses "Anwesenheit einer Tour/Relation in der Ankunfts- bzw. Abfahrtszeitscheibe und der Entlade- bzw. Belademenge"

Es muss darüberhinaus darauf geachtet werden, dass ein bestimmtes Verhältnis zwischen der in der Ankunftszeitscheibe zur Verfügung stehenden Anwesenheitszeit einer Nahtour und der darin über ein Tor in das System eintretenden LE eingehalten wird. Liegt die Entladedauer z. B. bei 90 Sekunden und ist der früheste Andockzeitpunkt einer Nahtour an ein Tor 15:10 (die dazugehörige ZS geht von 15:00 bis 15:30) so können in diesen 20 Minuten maximal nur $\lceil \frac{20 \cdot 60}{90} \rceil = 13$ LE entladen werden. Gleiches muss für die Abfahrtszeitscheibe einer Nahtour und die Beladung einer Fernrelation und deren frühest- und spätestmöglichen Zeitscheiben beachtet werden. Es ergibt sich:

$$\sum_{i \in A_{1d(a^k)}} x_{arci}^k \leq \left\lceil \frac{p^{a^k}}{e} \right\rceil, \forall k \in K \quad (12)$$

$$\sum_{i \in A_{1d(b^k)}} x_{arci}^k \leq \left\lceil \frac{p^{b^k}}{e} \right\rceil, \forall k \in K \quad (13)$$

$$\sum_{j=1}^{M'+J'} x_{arc_{d(a^l)A_{3l}^j}}^k \leq \left\lceil \frac{p^{a^l}}{b} \right\rceil, \forall l \in L \quad (14)$$

$$\sum_{j=1}^{M'+J'} x_{arc_{d(b^l)A_{3l}^j}}^k \leq \left\lceil \frac{p^{b^l}}{b} \right\rceil, \forall l \in L \quad (15)$$

Dabei ist p^{a^k} z. B. die Anzahl an Minuten, die die Nahtour k in der Ankunftszeitscheibe $d(a^k)$ anwesend ist. Durch $d(a^l)A_{3l}^j$ wird dabei die Kante von Tor j zur Fernrelation l in der Zeitscheibe $d(a^l)$ bezeichnet.

NB 7: Einhaltung des Sendungsmix

Eine jede Fernrelation l muss in Summe im Optimierungszeitraum genau die im Sendungsmix angegebene Anzahl an LE, d. h. d_{kl} LE, einer jeden Nahtour k erhalten. Es gilt daher zusätzlich:

$$\sum_{i \in A_{3l}} x_{arci}^k = d_{kl}, \forall l \in L, \forall k \in K \quad (16)$$

NB 8: Einhaltung der Ressourcenstärke für die innerbetriebliche Verbringung

Für die Dauer einer ZS dürfen bei der innerbetrieblichen Verbringung der Sendungen zwischen den Toren nicht mehr Wege gefahren werden, als maximal aufgrund der Anzahl und der Leistungseigenschaften der Ressourcen möglich ist. Hierdurch soll verhindert werden, dass zuviele Fahrzeuge gleichzeitig zur Entladung an die Tore angewiesen werden. Folgende Nebenbedingung garantiert die Beachtung einer bestimmten Ressourcenstärke:

$$\sum_{i \in A_{2t}} \sum_{k=1}^{K'} \alpha * x_{arci}^k * \frac{arc_i^{laenge} * 60}{g} \leq q * r \quad \forall t \in T \quad (17)$$

Auf der rechten Seite der Gleichungen steht jeweils die Anzahl an Arbeitsminuten, die je ZS maximal genutzt werden können, wenn 100% der Ressourcen arbeiten. Existieren z. B. $r = 5$ Gabelstapler und beträgt die ZS-Länge $q = 30$ Minuten, so stehen maximal 150 Minuten für die Verbringung zur Verfügung. Auf der linken Seite der Gleichungen stehen die je ZS zwischen den Toren, d. h. je Untermenge A_{2t} , in Summe geflossenen Mengen an LE, multipliziert mit der jeweiligen Entfernung und über die Geschwindigkeit der eingesetzten Umschlagmittelressourcen umgerechnet in Minuten. Der Faktor $\alpha \in \mathbb{R}$, $1 \leq \alpha \leq 2$, dient der Berücksichtigung von „Leerfahrten“. Im ungünstigsten Fall, werden so genannte Doppelspiele gefahren. Ein Gabelstapler fährt in diesem Fall zu einem Tor j , entlädt eine LE,

bringt sie zum Beladeter, fährt zurück zum gleichen Tor, nimmt die nächste LE auf und verfährt so weiter, bis das Fahrzeug entladen ist. Jeder Transportauftrag "Sendung von Tor j zu Tore i " wird somit verdoppelt, α wäre also gleich 2 (100%) zu setzen. Der wesentlich günstigere Fall, dass ein Gabelstapler am Ort wo er eine LE abstellt bereits den nächsten Auftrag aufnehmen kann, ist in der Praxis eher unwahrscheinlich. Für diesen idealisierten Fall wäre $\alpha = 1$. Eine Schätzung des Faktors α ist vorab nicht einfach. Eine absolute Vernachlässigung des Faktors bedeutet aber, dass nur jede mit einer LE gefahrene Strecke von dem Konto der zur Verfügung stehenden Arbeitsminuten abgezogen würde. Dies wäre eine zu schwache Annahme, was dazu führen kann, dass zuviele Fahrzeuge gleichzeitig je Zeitscheibe den Toren zugewiesen würden. Daher wird der Faktor α eingeführt und auf eine reelle Zahl zwischen 1 und 2 dimensioniert. Im Einzelfall einer Anlage, die mit Hilfe des hier entwickelten Modells optimiert werden soll, muss der Faktor in Zusammenarbeit mit dem Betreiber und einer eingehenden Analyse der Praxis festgelegt werden. Eine optimale Touren- bzw. Transportplanung für die innerbetrieblichen Umschlagmittelressourcen ist nicht Planungsaufgabe der hier dargestellten Torbelegungsplanung. Im eigentlichen Sinne wäre der Faktor α ein Resultat aus einer solchen Aufgabe.

NB 9: Maximale Beladeleistung je Tor

Da die Tore im Beladebereich (V_2) durch mehrere abgehende Kanten mit den Fernrelationsknoten aus V_3 verbunden sind, kann diese Bedingung nicht wie im Fall der Entladung über Kantenkapazitäten gewährleistet werden. Es wird daher folgende Nebenbedingung aufgestellt:

$$\sum_{i \in \{ {}^t A_{31}^j, \dots, {}^t A_{3L'}^j \}} x_{arc_i}^k \leq q/b, \quad \forall j \in M \cup J, \forall t \in T \quad (18)$$

NB 10: Kirchhoffsche Knotenregel

Grundsätzlich sollen im Stückgutgeschäft keine LE nach Beendigung des Verkehrstages innerhalb der Halle verbleiben. Somit muss modelliert werden, dass alle LE, die in einen der Knoten einfließen, diesen auch wieder verlassen. Hierfür wird folgende Nebenbedingung aufgestellt:

$$\sum_{i \in P(j)} x_{arc_i}^k = \sum_{i \in S(j)} x_{arc_i}^k, \quad \forall j \in V, \forall k \in K \quad (19)$$

$S(j)$ bezeichnet dabei alle von einem Knoten j abgehenden Kanten und $P(j)$ die Menge aller einmündenden Kanten.

NB 11: Beachtung der Kantenkapazitäten

Für alle beschriebenen Kanten wurden sinnvolle minimale und maximale Kapazitäten gesetzt. Diese müssen eingehalten werden:

$$\sum_{k=1}^{K'} x_{arc_i}^k \geq arc_i^{cap_{min}} \quad (20)$$

$$\sum_{k=1}^{K'} x_{arc_i}^k \leq arc_i^{cap_{max}} \quad (21)$$

$\forall i \in A$

3.2.4 Zielfunktion

Hauptziel der Planungsaufgabe Entwicklung optimaler Torbelegungspläne ist die Minimierung des für den Umschlag der Sendungen entstehenden innerbetrieblichen Aufwands, d. h.

der zu fahrenden Wegstrecken. Ein weiteres Ziel ist die möglichst frühe Einplanung der Nahverkehrs Touren, damit sie einerseits nicht unnötig warten müssen und andererseits die Tore in späten Zeitspannen für das Andocken zeitkritischer Touren freigehalten werden. Zwischen den beiden Zielsetzungen muss eine "Balance" gefunden werden, damit das zweitrangige Ziel der frühen Einplanung nicht grundsätzlich über die im Rahmen einer wegminimalen Lösung optimale Torbelegung gestellt wird. Die entwickelte Zielfunktion hat folgende Gestalt:

$$\min \sum_{t=1}^{T'} \left(\sum_{i \in A_{2_t}} B^t * x_{arc_i}^k * \left(\frac{arc_i^{laenge} * c}{g} \right) \right) \quad (22)$$

Hinter dem Ausdruck $x_{arc_i}^k$ mit $i \in A_{2_t}$ steht die Anzahl an LE vom Typ k , die über eine der Kanten zwischen den Toren in der Zeitscheibe t fließen. Diese werden mit der Länge der jeweiligen Kante in [km], geteilt durch die Geschwindigkeit der jeweiligen Ressource in [km/h], und den Kosten für den Einsatz einer Ressource c in [Euro/h] multipliziert. Die Konstante B^t gibt die "Bestrafung" für das späte Einsortieren einer Nahtour ein und steigt für steigende Zeitscheibenummern t an. Es wird hierdurch nicht grundsätzlich abgefangen, dass eine einzelne Tour sehr lange warten muss. Die Modellierung geht aber einen ersten Schritt in Richtung einer frühen Einplanung von Touren.

Das hier geschilderte Optimierungsmodell ist ein gemischt-ganzzahliges Optimierungsproblem und kann dementsprechend in CPLEX zur Lösung mit dem dort implementierten Branch-and-Cut Verfahren eingegeben werden. Der Aufbau des Modells wurde in VB programmiert und die Informationen an CPLEX übergeben. Es wurden unterschiedlich große Testszenarien gerechnet. Dabei wurde festgestellt, dass bereits bei einer mittleren Hallengröße von 40 Toren und einer mittleren Systemlast von ca. 60 Fahrzeugen zwar noch Lösungen gefunden werden, ein Nachweis über deren Optimalität aber nicht mehr möglich ist. Darüber hinaus beträgt die Rechenzeit bis zum Auffinden einer stabilen zulässigen Lösung bereits mehrere Minuten. Daher wurde eine Heuristik entwickelt, die gute Torbelegungspläne in wesentlich kürzerer Zeit entwickelt und diese auch dynamisch anpassen kann, falls Änderungen im System eintreten.

3.2.5 Übertragung auf den Sammelguteingang

Das vorgestellte Modell lässt sich relativ leicht auf den Fall des Sammelguteingangs übertragen. Der Unterschied in den beiden Planungsfällen SA - SE liegt darin, dass im SE beladene Fernverkehrstouren von den Partneranlagen eintreffen und diese zum Entladen den Toren zugewiesen werden müssen. Die Nahverkehrsrelationen werden im Vorhinein ebenso Toren zugewiesen, damit die entladenen Sendungen nach der Sortierung auf die Nahverkehrsrelationen vor den jeweiligen Toren in der Nacht bereit gestellt werden können. Die Planungsaufgabe ist folglich grundsätzlich die gleiche. Es sind jetzt nur die Fernreisen, die die Quellen von innerbetrieblichen Transportaufträgen sind, und die Nahverkehrsrelationen, die die entsprechenden Senken bilden. In manchen Anlagen gilt die Regel, dass eine abgehende Nahverkehrsrelation ein Tor nur alleine belegt, nicht. Im SE ist es aus Platzmangel häufig erforderlich, dass mehr als eine Nahverkehrsrelation über ein Tor abgewickelt werden muss. Die dritte Nebenbedingung müsste folglich ausgeschaltet oder auf eine positive Zahl größer als Eins gesetzt werden.

4 Entwicklung eines heuristischen Schedulingverfahrens

Das Ergebnis des oben beschriebenen Optimierungsmodells ist die Zuordnung der Touren zu Toren sowie eine zeitliche Fixierung ihrer Belegdauer. Dieses Ergebnis kann in Form eines Gantt-Charts visualisiert werden (siehe z. B. Abb. 5). In diesem Fall entsprechen die Balken den Toren während des Optimierungszeitraums also einem Verkehrstag in der Stückgutanlage. Die Belegung eines Tores durch eine Tour für eine bestimmte Dauer in Minuten beginnend zum Zeitpunkt x und endend zum Zeitpunkt y kann als Einfärbung des Balkens dargestellt werden. In dieser Darstellung ähnelt das Problem der optimalen Torbelegung einem Schedulingproblem. Die zur Verfügung stehenden Tore entsprechen den "Ressourcen", die Touren den "Jobs" mit unterschiedlichen Bearbeitungsdauern. Eine im Gantt-Chart dargestellte

Lösung der zugrunde liegenden Planungsaufgabe Entwicklung optimaler Torbelegungen ist zulässig, falls

- sich keine der eingefärbten Touren im Gantt-Chart überschneiden
- jede Tour innerhalb ihres erlaubten Zeitfensters (Fahrplan) eine Einfärbung erhält
- alle Touren nur technisch und logistisch erlaubten Toren zugewiesen wurden
- die Einfärbung einer Belegdauer proportional zur geladenen Sendungsmenge in LE ist
- gleichzeitig über alle Tore nur so viele Touren eingeplant sind, wie die vorhandenen Ressourcen für die nachgelagerten Transportprozesse auch bewältigen können
- alle Nahtouren und Fernouren genau einmal eingeplant sind.

Zwei unterschiedliche zulässige Lösungen können hinsichtlich der Zielkriterien Minimierung der Wegstrecken und der Wartezeiten miteinander verglichen werden, indem die resultierenden Wartezeiten (d. h. die Differenz zwischen Ankunft und Start der Bearbeitung) sowie die zwischen den Toren zu transportierenden Sendungsmengen multipliziert mit den jeweiligen Wegstrecken einfach aufaddiert werden.

Die Gantt-Darstellung kann somit für die Überprüfung der Zulässigkeit und zusätzlich der Güte von verschiedenen Lösungen herangezogen werden. Die im Folgenden vorgestellte Heuristik arbeitet somit nicht mehr auf dem zugrunde liegenden mathematischen Optimierungsmodell sondern rein auf der Visualisierung möglicher zulässiger Lösungen im Gantt-Chart. Es wird zunächst eine grobe Übersicht über die Schritte der Heuristik für den Fall des SA gegeben und diese im Anschluss detaillierter erläutert:

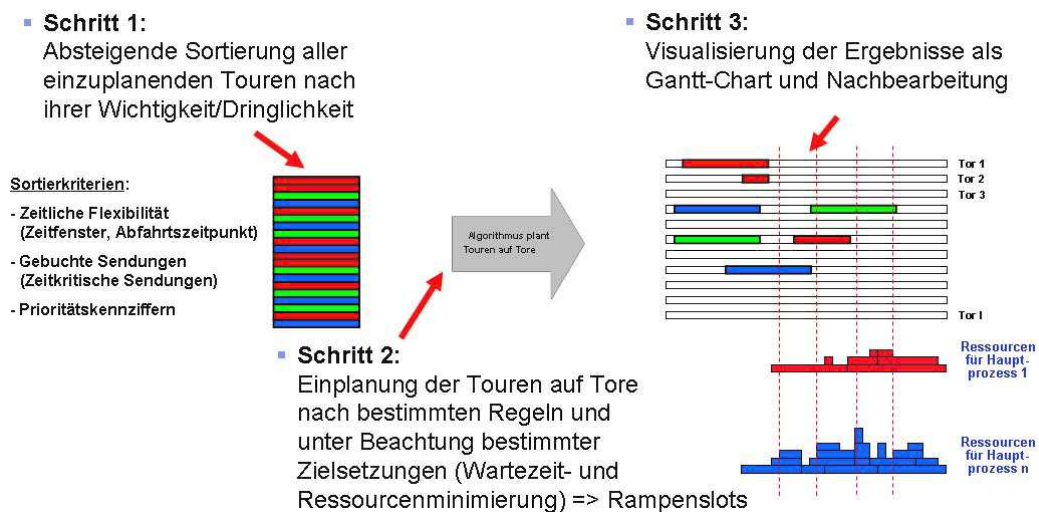


Abb. 4: Skizze des heuristischen Scheduling-Verfahrens

Zu Beginn des Verfahrens ist das Gantt-Chart leer. Es existieren Tabellen bezüglich der Entfernungen zwischen allen Toren, der logistischen Funktion (Entladung, Beladung, Mischform) der Tore und der vorhandenen Ressourcen mit ihren Leistungseigenschaften. Alle Touren, die für den aktuellen Verkehrstag avisiert sind, sind ebenso mit ihren Fahrplänen, logistischen Funktionen und ihren Sendungsmengen bzw. Sendungsmix in einer Tabelle hinterlegt. Zuerst werden alle Fernouren bzw. -relationen den hierfür erlaubten Toren zugeordnet, da diese die Tore während des kompletten Zeitraums belegen. Diese Zuordnung kann rein zufällig sein. Oder aber die absteigend sendungsmengenstärksten Fernrelationen werden nach und nach den Toren mit der aufsteigend geringsten durchschnittlichen Entfernung zu allen anderen Toren zugeordnet. Ebenso kann die Fixierung der Senken iterativ verändert werden, um so spätere Lösungen miteinander zu vergleichen, bis die beste Fernrelationszuordnung gefunden wurde. Bezüglich der Nahtouren gilt es in einem ersten Schritt nun festzustellen, welche Touren schnell in das Gantt-Chart eingeplant werden müssen, weil sie besonders

”schwer” sind. Hierunter wird die relative Wichtigkeit der Touren untereinander verstanden. Eine Tour mit einem extrem engen Zeitfenster etwa, sollte möglichst früh in das zu Anfang noch recht leere Gantt-Chart geplant werden, da dann noch viele Möglichkeiten frei sind. Je später Touren eingeplant werden, desto voller ist das Chart bereits und somit desto schwieriger die Findung eines zulässigen Rampenslots. Der Stapel mit allen bekannten Touren wird somit zunächst bezüglich der Wichtigkeit der Touren absteigend sortiert. Kriterien die dazu beitragen, dass eine Tour dabei im Stapel weiter nach oben sortiert wird sind

- die Nähe des Abfahrtszeitpunktes der Tour zum aktuellen Zeitpunkt: Diejenige Tour, die den Hof der Anlage sehr bald wieder verlassen muss, sollte möglichst bald eingeplant werden, um günstige Rampenslots zu erhalten
- die Nähe des Bedarfszeitpunktes einer der geladenen Sendungen zum aktuellen Zeitpunkt: Hat eine Nahtour eine Sendung geladen, die besonders zeitkritisch ist, weil sie z. B. auf eine Fernrelation mit einem baldigen Abfahrtszeitpunkt gebucht ist, so muss diese Nahtour möglichst bald eingeplant werden
- eine hohe ”künstliche” Priorität: Es wurden Prioritätskennziffern (1 - 5) eingeführt. Diese sollen es dem Disponenten ermöglichen, Touren, die er aus bestimmten, nicht standardisierten Gründen als wichtig einschätzt, eine Position weiter oben zuzuordnen zu können.

Die Liste der Sortierkriterien ist grundsätzlich je nach Anlagentyp und Zielsetzung der Betreiber erweiterbar.

In einem zweiten Schritt werden die Nahtouren nun von oben beginnend aus dem Stapel genommen und in das Gantt-Chart eingeplant. Dabei wird für eine bestimmte Tour so vorgegangen, dass zunächst alle erlaubten Tore identifiziert werden. Jedes dieser Tore wird durchlaufen, bis der frühestmögliche Rampenslot für diese Tour auf dem Tor ermittelt wurde. Ein Rampenslot auf einem Tor ist dabei nur dann zulässig, wenn er sowohl innerhalb des Zeitfensters der Tour liegt wie auch für die Lademenge der Tour lang genug ist. Darüber hinaus darf die Beanspruchung der innerbetrieblichen Umschlagmittelressourcen zu diesem Zeitpunkt aus den bereits zugewiesenen Touren und den daraus resultierende Wegstrecken nach Zuweisung der neuen Tour nicht überstiegen werden. Es wird aus allen Toren dasjenige gewählt, das bezüglich der beiden Zielkriterien Wartezeiten und Wegstrecken zu der geringsten Erhöhung führt. Hierbei wird über eine prozentuale Gewichtung der Zielkriterien untereinander gesteuert, welche der beiden Zielkriterien dabei stärker berücksichtigt wird. Die eventuelle Wartezeit wird notiert und die Summe der resultierenden Wegstrecken wird um die dadurch entstehenden gewichteten Wege (Sendungsmengen multipliziert mit den Entfernungen zu den Fernrelationstoren) erhöht. Es ist zusätzlich möglich, die Zielkriterien Wartezeitminimierung und Wegstreckenminimierung ein- und auszuschalten. Soll beispielsweise keine Wartezeitminimierung betrachtet werden, da der Anlagenbetreiber Subunternehmer beschäftigt und ihm eine Schonung der eigenen Ressourcen wichtiger ist, so würde ausschließlich auf die Findung eines Rampenslots Wert gelegt, der zu einer geringeren Erhöhung der Wegstrecken führt. Abschließend werden die Ergebnisse der Heuristik im Gantt-Chart dargestellt.

Der Vorteil der Heuristik liegt in einer schnellen Berechnung zulässiger Torbelegungen bei gleichzeitiger Berücksichtigung von zwei Zielkriterien. Sie eignet sich somit für den Einsatz in einem dynamischen Dispositionsleitstand, bei dem zum einen Regelpläne für einen kompletten Verkehrstag aufgrund der aktuell vorhanden Daten berechnet werden müssen. Andererseits aber auch bestehende Pläne aufgrund dynamischer Veränderungen (z. B. Fahrzeugverspätungen oder Prozessverzögerungen an der Rampe) angepasst werden müssen. In Kooperation mit hafa Docking Systems wurde ein Prototyp für einen solchen Dispositionsleitstand entwickelt, der im folgenden Kapitel vorgestellt wird.

5 LoadDock Navigation - ein intelligenter dynamischer Dispositionsleitstand

Die Bedienung des Dispositionsleitstandes erfolgt über zwei Monitore. Auf der linken Seite wird über eine Kalenderfunktion der zu planende Verkehrstag ausgewählt.

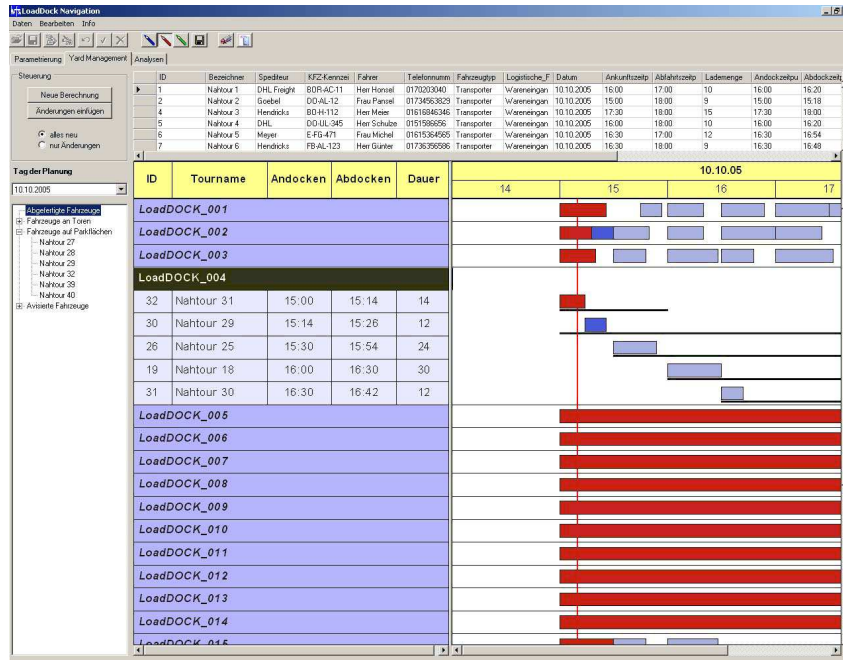


Abb. 5: Darstellung der optimalen Torbelegungspläne als Gantt-Chart

Die an dem gewählten Tag relevanten Tourdaten werden aus einer Datenbank eingelesen, die mit der Speditionssoftware beispielsweise verbunden sein kann. Sämtliche Informationen zu den avisierten Touren, wie etwa die Lademenge, der Fahrplan, die beauftragte Spedition etc. werden in einem Datagrid im oberen Bereich des linken Monitors angezeigt. Anschließend wird die Heuristik angestoßen und ein optimaler Torbelegungsplan für den Tag berechnet. Das Ergebnis wird in einem Gantt-Chart visualisiert. Der Disponent kann das Ergebnis nachbearbeiten, indem er per Drag-and-Drop einzelne Touren im Gantt-Chart entweder auf dem aktuellen Tor nur zeitlich oder aber auch zusätzlich noch zwischen den Toren verschiebt. Verletzt er hierbei eine der Planungsregeln, wie etwa den Fahrplan, so wird eine Fehlermeldung ausgegeben. Schreitet die Zeit voran, so färben sich die Touren entsprechend ihres Status ein:

- Rote Einfärbung: Touren, die aktuell an Toren stehen.
- Dunkelblaue Färbung: Bereits abgefertigte Touren.
- Mittelblaue Färbung: Touren, die auf Parkflächen stehen.
- Hellblaue Färbung: Avisierte Touren, die sich noch auf dem Weg zur Anlage befinden.

Erhält der Disponent einen Hinweis (z. B. per Anruf), dass sich eines der Fahrzeuge verspätet, so kann er dies im Datagrid eingeben und eine Neuplanung der betroffenen Tour sowie aller nachfolgend betroffenen Touren des ursprünglich geplanten Tores anstoßen.

Auf dem rechten Monitor wird der aktuelle Zustand der Anlage dargestellt. Das Unternehmen hafa Docking Systems hat eine neue Sensortechnik für die Tore und Überladerampen in logistischen Anlagen entwickelt. Diese schreibt zu jedem Zeitpunkt Informationen zu dem Zustand eines jeden Tors (Fahrzeug steht vor dem Tor oder Tor ist frei, Ent- oder Beladeprozess hat begonnen oder Rampe ist in Ruheposition) in eine Datenbank.

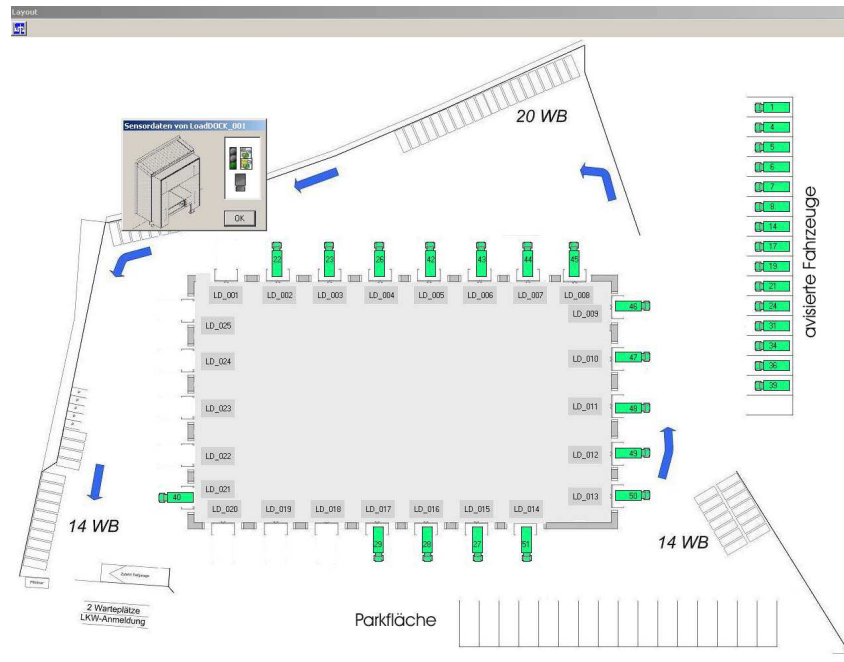


Abb. 6: Darstellung der Ist-Situation im Layout der Anlage

Hierdurch können bisherige Funk- und Kameralösungen automatisch ersetzt werden. Die Datenbankinformationen sind an den Dispositionsleitstand angebunden. Ist laut Sensortechnik also z. B. an Tor Nr. 2 derzeit kein Fahrzeug angedockt, was aber laut dem berechneten Regelplan im Gantt-Chart der Fall sein sollte, so erscheint ein Fehlerhinweis sowie eine Einfärbung aller durch die Abweichung betroffenen Touren. Ebenso wird ein zu langes Stehen der Fahrzeuge an den Toren z. B. aufgrund von innerbetrieblichen Prozessschwierigkeiten festgestellt und dem Disponenten mitgeteilt. Der Disponent kann nun Umplanungen anstoßen indem er selbst Entscheidungen trifft oder aber sich durch die Heuristik Vorschläge für neue Rampenslots generieren lässt und diese akzeptiert oder verwirft. Nimmt der Disponent hier Änderungen aufgrund seiner eigenen Erfahrungen vor, so kann er die betroffenen Touren erneut per Drag-and-Drop im Gantt-Chart verschieben oder aber die entsprechenden Fahrzeuge auch im Layout-Plan per Drag-and-Drop zwischen den Zuständen "Avisiert", "Auf der Parkfläche" und "An einem bestimmten Tor angedockt" verschieben.

Die Daten und Entscheidungen eines jeden Verkehrstages werden in eine Datenbank zurück geschrieben und können somit im Nachhinein für unterschiedliche Zeiträume ausgewertet werden. Angeboten werden Analysen zu den durchschnittlichen Zeiten für die Hauptprozesse Be- und Entladung, zu den Auslastungen der Ressourcen Tore, Flächen und Umschlagmittel und Angaben zu Kosten und Wartezeiten je Tour. Diese werden in Form von Balkendiagrammen bzw. in ihrem zeitlichen Verlauf als Liniendiagramme dargestellt.

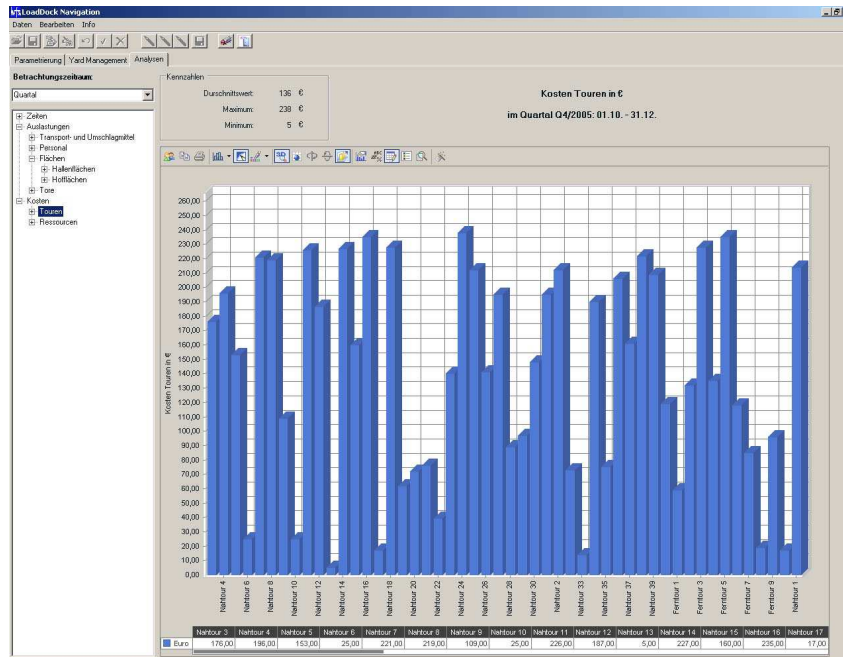


Abb. 7: Analysen zu Prozesszeiten, Kosten und Ressourcenauslastungen

Daneben besteht die Möglichkeit über eine Parametrierungsseite bestimmte Einstellungen bezüglich der Arbeitsweise der Heuristik vorzunehmen. Hier kann z. B. das Optimierungsziel (Wartezeitminimierung, Wegstreckenminimierung, simultane Verfolgung beider Ziele) oder der Umgang mit den vorhandenen Umschlagmittelressourcen (100%-ige Auslastung, Einhalten bestimmter Reserven) definiert werden. Des Weiteren können Strukturdaten zu der Anlage parametrierbar werden. Fällt an einem Tag z. B. ein Gabelstapler aus oder aber sind bestimmte Tore aufgrund von Wartungen gesperrt, so kann dies manuell eingegeben und somit von der Heuristik berücksichtigt werden.

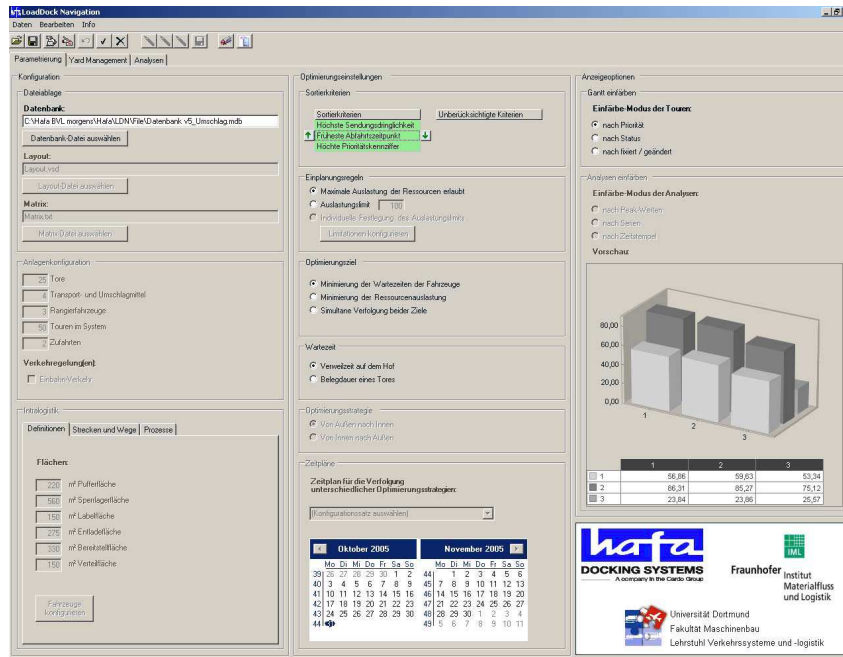


Abb. 8: Parametrierung der Arbeitsweise der Heuristik und der Strukturdaten der Anlage

Der entwickelte Dispositionsleitstand verbindet zwei Neuerungen in der logistischen Praxis. Zum einen bietet die neue Sensortechnologie von hafa Docking Systems eine erhöhte

Transparenz bezüglich des aktuellen Zustands an der Schnittstelle Rampe, die automatisch darauf aufsetzenden Systemen zur Verfügung gestellt wird. Zum anderen bietet das integrierte heuristische Schedulingverfahren erstmalig eine intelligente Planungsunterstützung des Disponenten bei der komplexen zeitlichen und örtlichen Zuordnung der Fahrzeuge an die Tore. Eine parallele Visualisierung der Planungsergebnisse in Gantt-Charts sowie der aktuellen Situation im Layout der Anlage, kombiniert mit einer intuitiven Drag-and-Drop Bedienfunktionalität und einer Analysemaske zu Prozesszeiten und Ressourcenauslastungen ermöglicht dem Disponenten eine komplette Übersicht über die Ist- und die Sollsituation bzw. die Abweichung der Umschlagsperformanz von bestimmten Kennzahlen. Der Dispositionsleitstand wurde erstmalig auf dem BVL-Kongress 2005 in Berlin vorgestellt und wird nun in einem nächsten Schritt bei einem Referenzkunden zu einer Testanwendung gebracht.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Das Planungsproblem der Zuweisung von Fahrzeugen an Tore in einer Stückgutspeditionsanlage und die Festlegung der jeweiligen Reihenfolge bei der Belegung der Tore wurde als zeitdiskretes Mehrgüterflussproblem mit Nebenbedingungen mathematisch modelliert. Das Optimierungsmodell unter Kapitel 3 wurde in CPLEX umgesetzt und auf unterschiedlich große Testszenarien angewandt. Dabei wurden bei dem MILP jeweils keine, mittlere und starke Zeitscheibenbestrafungen in die Zielfunktion integriert. Ab einer mittleren Anlagengröße und einer mittleren Systemlast liefert das in CPLEX implementierte exakte Branch-and-Cut Verfahren zwar noch zulässige Lösungen, die Laufzeit ist jedoch aufgrund der Problemkomplexität für Praxisanwendungen nicht mehr adäquat. Daher wurde parallel ein heuristisches Schedulingverfahren entwickelt, welches einfach erweiterbar ist und schnell zulässige und hinreichend gute Torbelegungspläne liefert. Hier gilt es nun bezüglich der Entwicklung weiterer Verfahren zu forschen. Möglichkeiten bieten sich dabei auf dem Gebiet der evolutionären Algorithmen, der hybriden Lösungsverfahren oder aber des Branch-and-Price Algorithmus. Bezüglich des entwickelten mathematischen Optimierungsmodells lässt sich festhalten, dass die Planungsaufgabe der optimalen Torbelegung wesentlich praxisnäher beschrieben wurde als dies bisher im Stand der Forschung der Fall war. Hierdurch konnte ein Instrument zur Verfügung gestellt werden, welches für den realen Betrieb der Anlage sowohl die Organisation der Abläufe auf dem Hof, wie auch den innerbetrieblichen Ressourcenbedarf optimiert. Einige Aspekte bezüglich der innerbetrieblichen Abläufe sind jedoch in dem Modell bisher vereinfachend angenommen worden. So wurde z. B. das Vorhandensein von Logistikflächen und deren Kapazitäten oder auch die Existenz verschiedener Hauptprozesse und ihnen zugewiesene unterschiedliche Ressourcentypen nicht beachtet. Aufgrund der Natur des Mehrgüterflussmodells ist das Modell in diese Richtung aber durch die Definition zusätzlicher Knoten- und Kantenebenen relativ einfach erweiterbar. Dies wird in einem nächsten Schritt erfolgen. Die entwickelte Heuristik wurde in einen dynamischen Dispositionsleitstand integriert. Die Leistungsfähigkeit des Dispositionsleitstandes und vor allem der qualitative und quantitative Nutzen werden nun in einer Testanwendung bei einem ersten Referenzkunden abgeleitet.

Literaturverzeichnis:

- [Bermudez] Bermudez, R.: A genetic algorithm approach to door assignments in breakbulk terminals, www.ntl.bts.gov/lib/200207/15cb008.doc
- [Lublow] Lublow, R.: Konzeption eines telematikgetützten Speditionsleitstandes für den Sammelgutumschlag, Verlag Praxiswissen, 1995
- [Gue1] Gue, G., Bartholdi, J.: Reducing Labor Costs in an LTL Cross-docking Terminals, In: Operations Research, vol. 48, (2000), Seite 823-832
- [Gue2] Gue, G., Bartholdi, J.: The effects of Trailer Scheduling on the Layout of Freight Terminals, In: Transportation Science, vol. 33, (1999), No. 4, 419-428,

[Clausen] Clausen, U.; Goerke, M.:Nur gemeinsam überzeugend - Anforderungen an eine speditionelle Umschlaganlage, DHF-Deutsche Hebe- und Förder-technik, (2004), Seite 158-160