

Über die Simulation zum funktionalen System

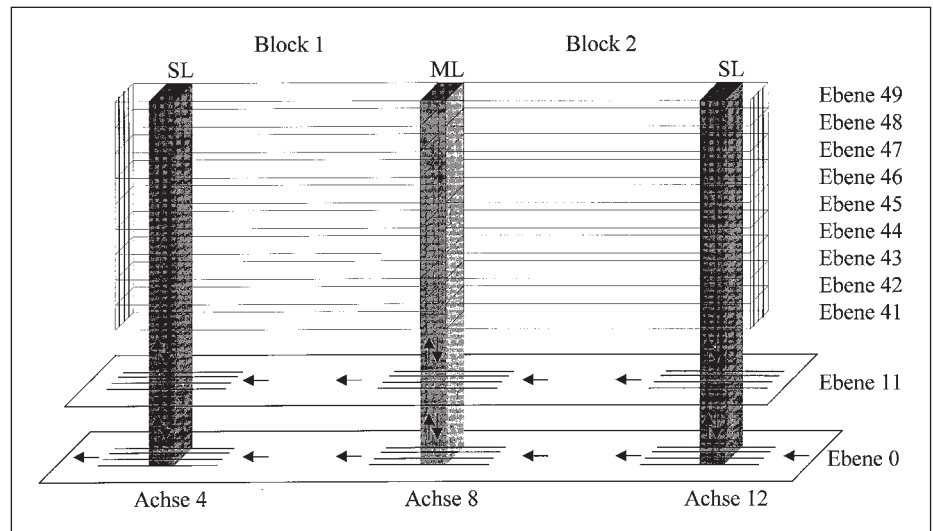
KAI GUTENSWAGER, KARL AUGUST FAUTH

Das Transportmittel Flugzeug hat im internationalen Cargo-Geschäft in den letzten Jahren an Bedeutung gewonnen. Bei der Swissair lag z. B. die Kennzahl Tonnenkilometer im Mai 1995 bei 127605, im gleichen Monat des Jahres 1996 bereits bei 142373 (+12%). Da für die folgenden Jahre mit einem noch stärker wachsenden Aufkommen zu rechnen ist, steigen gleichzeitig die Anforderungen an die Logistik. Hier sind neben der Erstellung geeigneter Flugpläne auch die Konzeption des Warenumschlags am Boden, d. h. die Form und Koordination der Zwischenlagerung der Fracht am Flughafen, von entscheidender Bedeutung für die Leistungsfähigkeit der Distribution.

Das Unternehmen Cargologic ist eine Tochtergesellschaft der SAirGroup, zu der auch die Swissair gehört. Als Reaktion auf die sich verändernden Rahmenbedingungen, d. h. steigendes Frachtaufkommen, haben sich die Verantwortlichen der Cargologic entschieden, das Projekt Cargo-Hub-2001 zu initiieren. Bestandteil dieses Vorhabens ist u. a. ein neues Hochregallagerkonzept für den Flughafen Zürich. An diesem Standort sollen in Zukunft bis 7500 Paletten/Tag ein- und ausgelagert werden. Dazu soll ein Teil der Auslagerungen innerhalb von 15 Minuten nach Anforderung realisierbar sein.

Eine Simulationsstudie, die in einem Zeitraum von fünf Monaten durchgeführt wurde, diente der Entwicklung der Steuerungsstrategien für alle eingesetzten Fahrzeuge, der Strategien zur Bestimmung von Lagerplätzen für Paletten sowie der Bewertung des daraus resultierenden Lagersystems im Hinblick auf die gestellten Anforderungen.

K. Gutenschwager ist Mitarbeiter der SimPlan Gesellschaft für Simulation betrieblicher Abläufe mbH. K. A. Fauth ist Mitarbeiter der Cegelec AEG Anlagen- und Automatisierungstechnik GmbH



1: Layout des Hochregallagers
ML - Manitrac-Lift, SL - Sendungslift

Modellbeschreibung

Das Layout des Lagers war zu Beginn der Simulationsstudie in den wichtigsten Punkten durch das von der Manitec Consulting AG erarbeitete Lagerkonzept bereits vorhanden. Aus diesem Grunde diente die Studie nicht dem Vergleich verschiedener Systemlösungen. Das Simulationsmodell wurde in zwei Phasen erstellt, wobei man im Anschluß an beide Phasen eine Reihe von Experimenten durchführte. In der ersten Phase wurde der Bereich der Vorzonen, die Ein- und Ausgabepunkte des Lagers, als black box beschrieben. In der zweiten Stufe wurde dann dieser Bereich detailliert in die Betrachtung aufgenommen, um genauere Leistungsmerkmale dieses Systemauschnitts bestimmen zu können. In beiden Modellen wurde die Lagerverwaltung vollständig abgebildet, d. h. jede Palette und jedes Lagerfach wurden einzeln im Modell verwaltet.

Das HRL bietet ca. 8200 Lagerplätze, die sich über neun Ebenen (Ebene 41 bis Ebene 49) und vier von einander unabhängige Gänge verteilen (Bild 1). Die Ebenen sind von den eingesetzten fahrerlosen Bediengeräten (Manitracs) nur über die vier Manitrac-Lifte erreichbar. Da die Bediengeräte nicht den Gang wechseln können, kann jedes Bediengerät jeweils neun (Anzahl Ebenen) mal zwei (Anzahl Blöcke) Gangabschnitte bedienen. Die Lifte, deren maximale Geschwindigkeit ca. 2 m/s beträgt, müssen auch für Blockwechsel genutzt werden.

Zwei Lagerplätze sind jeweils zu einem Lagerfach zusammengefaßt, in dem sich entweder zwei Europaletten (eine Europalette entspricht einer Lasteinheit) oder eine Großpalette (zwei Lasteinheiten) lagern lassen. Die Bediengeräte, die eine Geschwindigkeit von 3 m/s erreichen können, sind in der Lage, zwei Europaletten gleichzeitig aus einem Lagerfach aufzunehmen. Ein solches (Doppel-)Gabelspiel benötigt die gleiche Zeit, ca. 8 s, wie ein Einzel-Gabelspiel. Die Ein- und Ausgabepunkte des Lagers befinden sich auf den Ebenen 0 und 11 (in Bild 1 jeweils durch Pfeile gekennzeichnet). Da einzulagernde Paletten vorrangig an der Achse 4 aufgegeben, zum Großteil an der Achse 12 aber abgegeben werden müssen, ist zudem ein Materialfluß (ca. 21% der eingelagerten Paletten) vom Block 1 in den Block 2 gegeben.

In jedem Gangabschnitt hat ein Bediengerät die Möglichkeit, Ein- und Auslagerungen über den jeweiligen Sendungslift, dessen maximale Geschwindigkeit ca. 2,5 m/s beträgt, auszuführen. Hierzu dient ein Liftübergabefach, auf das sich vom Bediengerät und vom Sendungslift zugreifen läßt. Der Zugriff vom Sendungslift dauert ca. 9 s. Da in jedem Gangabschnitt ein Liftübergabefach vorhanden ist, sind Ein- und Auslagerungen über das gleiche Fach abzuwickeln; somit ist eine Synchronisation dieser Vorgänge erforderlich.

Im Simulationsmodell, das unter dem Simulationsystem SiMPLE++ entwickelt

wurde, ließen sich Beschleunigungs- und Abbremsverhalten der eingesetzten Fahrzeuge exakt abbilden, um die geforderte Realitätsnähe zu erlangen. Auch die Auftragsverwaltung wurde in die Betrachtung aufgenommen.

Steuerungsstrategien

In einem ersten Projektabschnitt wurden alle im System eingesetzten Strategien entworfen. Die in den folgenden Abschnitten beschriebenen, letztendlich implementierten Strategien sind allerdings das Ergebnis eines iterativen Prozesses von Simulationsexperimenten, Systembewertung und -gestaltung.

Steuerung der Lifte

Die Steuerung der Lifte basiert auf der Forderung nach termingerechter Auslagerung. Dies bedeutet, daß Lifte immer die Ebene als nächstes ansteuern, auf der der dringlichste Auftrag bereitliegt. Die Sendungslifte können zwei Europaletten gleichzeitig transportieren. Aus diesem Grunde wird angestrebt, über die Lifte Paare von Europaletten über verschiedene Ebenen des Lagers zu bilden, um somit die Kapazität der Lifte so gut wie möglich auszunutzen. Darüber hinaus lassen sich auch Paare bilden, wenn diese auf den beiden Abgabebenen wieder getrennt werden müssen. Einlagerungen werden immer dann eingeplant, wenn keine Auslagerungsaufträge mehr vorliegen, oder eine Auslagerungsfahrt beendet ist und der Lift sich auf einer der beiden Abgabebenen leer befindet. Auch für die Einlagerungsseite wird die Möglichkeit der Paarbildung über die beiden Ebenen in Betracht gezogen.

Da die Manitrac-Lifte immer ein Bediengerät transportieren müssen, um eine Ein- oder Auslagerung über die Achse 8 zu realisieren, wird die nächste Ebene, auf der das Bediengerät seine Arbeit wieder aufnimmt, durch die Zielebene der zu transportierenden Einlagerungs- und/oder Umlagerungspalette bestimmt. Hat das Bediengerät allerdings nur eine Auslagerung vorgenommen, und es liegt kein Einlagerungsauftrag vor, so bekommt das Bediengerät den Gangabschnitt zugewiesen, in dem der dringlichste Auslagerungsauftrag und keine Reservierung für ein anderes Bediengerät vorliegt.

Steuerung der Bediengeräte

Ein Bediengerät bearbeitet in jedem Gangabschnitt, den es auf Basis des dringlichsten Auslagerungsauftrags zugewiesen bekommen hat: Zuerst wird das Bediengerät entladen, sofern es Ein- und/oder Umlagerungspaletten aufgeladen hat. Danach beginnt das Bediengerät mit den Einlagerungen über das Liftübergabefach, bis dieses nicht mehr reserviert wird. Im dritten Schritt wird das Bediengerät max. zweimal das Liftübergabefach mit Auslagerungspaletten beladen. Die Auswahl geschieht nach Dringlichkeit der Termine. Im letzten Schritt werden Auslagerungspalette(n) für Achse 8 und/oder Umlage-

rungspalette(n) aufgenommen, und das Bediengerät meldet sich am Lift für eine Neudispositionierung wieder an. Der Zielgangabschnitt für Umlagerungspaletten aus Block 1 wird analog der Strategie zur Bestimmung von Einlagerungsplätzen bestimmt.

Lagerplatzbestimmung

An den Eingabepunkten zum Lager werden Paletten entweder direkt vom Lkw (Spedition) oder nach der Umladung von Containern auf Bereitstellplätzen zwischengelagert. Auf diesen Bereitstellplätzen warten die einzelnen Europaletten eine kurze Zeit, bis ein Lagerplatz für die Palette bestimmt werden kann. Ziel ist, innerhalb der Wartezeit Paare auf den Bereitstellplätzen zu bilden, so daß sich die Kapazität der Lifte (und Bediengeräte) vollständig nutzen läßt. Die Paarbildung findet bevorzugt nach Typen (Import, Kurz- oder Langstrecke) statt, da dadurch synchron die Wahrscheinlichkeit einer gleichzeitigen Anforderung zur Auslagerung steigt.

Es wird versucht, Einlagerungen immer in den Gangabschnitten vorzunehmen, in denen auch die dringlichsten Auslagerungsaufträge anstehen. Durch diese Vorgehensweise wird sichergestellt, daß bei entsprechendem Auftragsdruck eine Einlagerungspalette bereits im Liftübergabefach bereitsteht, wenn das Bediengerät in den Gangabschnitt einfährt. Damit aber auf der anderen Seite nicht allzu viele Paletten fortlaufend in den gleichen Gangabschnitt eingelagert werden, ist die Anzahl der Einlagerungen in einen Gangabschnitt limitiert. Die Grenze wird auf Basis der Größe möglicher Rückstaus an den einzelnen Eingabepunkten dynamisch bestimmt. Liegt ein Rückstau vor, so ist dies ein Indikator dafür, daß die anstehenden Auslagerungsaufträge nicht ausreichen, um alle Einlagerungen in Kombination mit Auslagerungen eins zu eins abzuarbeiten. In diesem Fall wird daher das Verhältnis von Ein- zu Auslagerungsfahrten zugunsten der Einlagerungsseite kurzzeitig angehoben. Eine weitere Ursache für einen Rückstau ist darin zu sehen, daß temporär eine Systemüberlastung vorliegt.

Einlagerungen dürfen neben dieser Restriktion auch dann nicht eingeplant werden, wenn das Liftübergabefach des entsprechenden Gangabschnitts reserviert oder belegt ist. Somit wird eine evtl. mögliche Blockierung des Sendungslifts verhindert. Ist der Weg zum Liftübergabefach frei und eine Einlagerung zulässig, so wird innerhalb des potentiellen Gangabschnitts ein freies Fach gesucht. Auch hier wird bei Transport einer einzelnen Europalette versucht, diese im Lager mit einer weiteren Palette identischen Typs zu kombinieren.

Aufbau der Experimente

Da das Lager innerhalb eines Tages unterschiedlich stark beansprucht wird (am Morgen stehen z. B. vorwiegend Auslagerungen an Spediteure über die Achse 4 an), wurden zwei Szenarien aufgestellt. Diese werden als Ein- bzw. Auslagerungsspitze bezeichnet und sind durch die max. zu erwartende Last, die in Spitzenstunden an den unterschiedlichen Ein- und Ausgabepunkten zu erwarten ist, gekennzeichnet. In *Tabelle 1* sind diese „Anforderungen“ an die Systemleistung in Form zweier Stundenprofile aufgelistet.

Die geforderten Größen für das Szenario der Einlagerungsspitze sind z. B. für die Achse 4: Innerhalb einer Stunde sind bis 340 Lasteinheiten einzulagern und gleichzeitig 120 Auslagerungen vorzunehmen. Ausgehend von einer Gesamtlast von 2 600 bzw. 3 100 Lasteinheiten in acht Stunden, wurden weitere Stundenprofile vergleichsweise „normaler“ Last auf der Basis von Wahrscheinlichkeitsverteilungen generiert. In allen Experimenten wurden Ein- und Auslagerungsaufträge auf Basis der einzelnen Stundenprofile erzeugt, wobei jeweils nach vier Stunden „normaler“ Last in zwei direkt aufeinander folgenden Stunden der identischen Spitze die Systemleistung für eine Stunde gemessen wurde. In zwei abschließenden Stunden mit normaler Last bewertete man dann u. a., ob das System einen evtl. entstandenen Auftragsüberhang wieder abbauen konnte.

Neben den Anforderungen in bezug auf den Durchsatz war auch die Beurteilung des Reaktionszeitverhaltens des Systems für Auslagerungsaufträge relevant. Alle Auslagerungen sollten spätestens 60 Minuten nach Anforderung stattfinden. Für die Achse 4 definierte man die zusätzliche Anforderung, 90% der angeforderten Lasteinheiten binnen 15 und 99% innerhalb von 30 Minuten bereitzustellen. In den Experimenten wurde der Einsatz von 12, 16 und 24 Bediengeräten miteinander verglichen.

Ergebnisse

Wie o. g. war die Strategieentwicklung ein iterativer Prozeß. Ein Manko erster Strategien war das starre Verhältnis von Ein- zu Auslagerungen; d. h. es ließen sich zwei Auslagerungsfahrten eines Sendungslifts auch nur genau zwei Einlagerungsfahrten für den gleichen Gangabschnitt zuordnen. Es ist theoretisch zwar möglich, bei jeweils zwei Fahrten ein Verhältnis Ein- zu Auslagerungen von vier zu eins Lagereinheiten zu erreichen. Werden bei jedem Auftragspaket eines Bediengerätes aber mehr als eine Europalette in einem Gangabschnitt ausgelagert, so verschiebt sich dieses Verhältnis. In ersten Experimenten mit 16 Be-

Tab. 1: Anforderungen an die Systemleistung

	Einlagerungsspitze			Auslagerungsspitze		
	Achse 4	Achse 8	Achse 12	Achse 4	Achse 8	Achse 12
Anzahl Einlagerungen/h	340	20	220	240	10	40
Anzahl Auslagerungen/h	120	90	120	280	140	200

Einlagerungsspitze						
	12 Bediengeräte			16 Bediengeräte		
	Achse 4	Achse 8	Achse 12	Achse 4	Achse 8	Achse 12
Einlagerungen [%]	79	100	83	92	100	96
Auslagerungen [%]	89	98	82	93	100	97

Tab. II: Vergleich der Ergebnisgrößen für 12 und 16 Bediengeräte

Auslagerungsspitze						
	12 Bediengeräte			16 Bediengeräte		
	Achse 4	Achse 8	Achse 12	Achse 4	Achse 8	Achse 12
Einlagerungen [%]	90	100	100	100	100	100
Auslagerungen [%]	85	89	89	95	100	99

diengeräten ließen sich von den geforderten 340 Lasteinheiten an der Achse 4 lediglich 250 in der Meßstunde einlagern.

Durch die skizzierte Dynamisierung des Verhältnisses konnten von den geforderten 340 Einlagerungen 313 erbracht werden. Ein Vergleich der Ergebnisgrößen für 12 und 16 Bediengeräte zeigt *Tabelle II*. Für das Szenario mit 24 Bediengeräten ließen sich nahezu 100% der Anforderungen erfüllen.

Ein weiteres Ergebnis der Simulationsstudie war, daß bei Einsatz von 12 Bediengeräten die geforderte Termintreue nicht erbracht werden konnte. Außerdem stellte man fest, daß sich ein Rückstau an Auslagerungsaufträgen auch in den Stunden mit vergleichsweise niedriger Last nicht mehr abbauen ließ. Eine Erhöhung der Bediengeräte um eins pro Gasse auf 16 bewirkte eine deutliche Leistungssteigerung, so daß ca. 70% der Auslagerungen an der kritischen Achse 4 (Importausgabe) innerhalb von 15 Minuten stattfinden konnten. Das Ergebnis für die Auslagerungsspitze an der Achse 4 bei Einsatz von 12, 16 und 24 Bediengeräten zeigt *Bild 2*.

Wie *Bild 2* weiter zu entnehmen ist, ist bei Einsatz von 24, gegenüber 16 Bediengeräten, das Reaktionszeitverhalten erheblich besser in bezug auf den Prozentsatz an Lasteinheiten, die innerhalb von 15 Minuten ausgelagert wurden. Aber bereits die entsprechenden Werte für die 20-Minuten-Grenze liegen sehr dicht beieinander. Es stellt sich somit die Frage, ob der Zeitvorsprung von fünf Minuten für 20% der Aus-

lagerungen den Einsatz acht weiterer Bediengeräte rechtfertigt.

Die sukzessive Erhöhung der Anzahl Bediengeräte bewirkte eine stetige Verschiebung des Systemengpasses von den Bediengeräten zu den Sendungsliften an der Achse 4. Eine Verbesserung des zunächst geforderten Durchsatzes, der mit 24 Bediengeräten zu mehr als 99% an der Achse 4 erreicht werden kann, ist über die Installation weiterer Sendungslifte, die im Layout vorgesehen sind, möglich. Eine weitere Erhöhung des Durchsatzes durch den zusätzlichen Einsatz weiterer Bediengeräte läßt sich aber nicht erreichen, da in den entsprechenden Experimenten die Sendungslifte an der Achse 4 zu nahezu 100% ausgelastet waren.

Dies bedeutet aber auch, daß eine vergleichsweise schlechte Ausnutzung der Kapazität der Sendungslifte an der Achse 4 fast automatisch zu einer Verringerung der Systemleistung führt. Positiv formuliert bedeutet dies: In der Ausgestaltung der Paarbildung von Europaletten auf der Auslagerungsseite besteht die Möglichkeit, die Systemleistung weiter zu erhöhen. Sowohl für das Szenario mit 16 als auch mit 24 Bediengeräten lag der Grad der paarweise ausgelagerten Europaletten bei rd. 90%. Ein weiteres wichtiges Ergebnis der Simulationsstudie ist demnach, daß ein operatives Planungssystem zum Festlegen von Anforderungzeitpunkten zur Auslagerung von Paletten sich am Ziel der vollständigen Auslastung der Kapazitäten der Lifte und Bediengeräte zu orientieren hat.

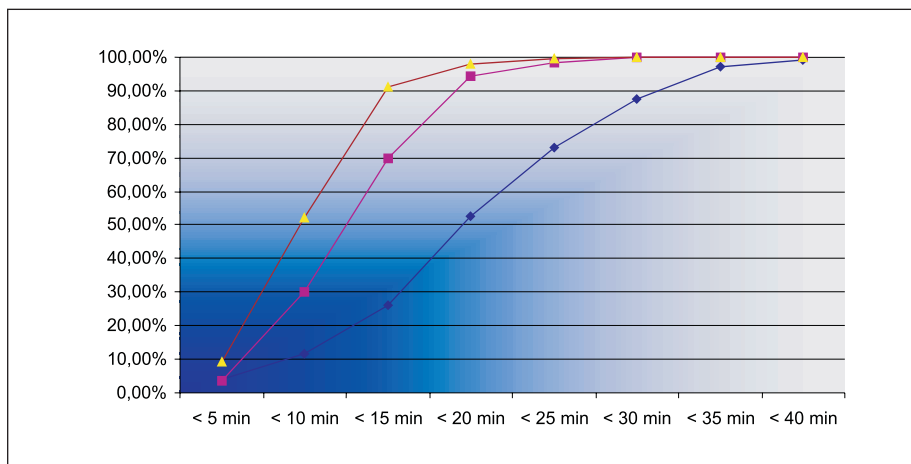
Dies ist auch deshalb sinnvoll, weil an den Liftübergabefächern hohe Wartezeiten für die Bediengeräte entstehen (ca. 15% der Betriebszeit). Das liegt primär daran, daß das gleiche Fach für Ein- und Auslagerungen genutzt wird und keine Staustrrecken in den Gangabschnitten vorgesehen sind. Die Auslastung der Bediengeräte ist somit auch von der Zuarbeit der Sendungslifte abhängig. Die Wartezeiten lassen sich vermindern, indem Sendungslifte weniger Ebenen ansteuern müssen, um alle geforderten Auslagerungen vorzunehmen. Eine verbesserte Ausnutzung der Sendungslifte führt somit auch zu einer besseren Ausnutzung der Bediengeräte.

Fazit

Die Simulation konnte in diesem Projekt wertvolle Informationen über die Qualität der aufgestellten Steuerungsstrategien liefern. Außerdem diente sie im Rahmen eines iterativen Optimierungsprozesses der sukzessiven Verbesserung der Systemgestaltung. Neben Aussagen über die erforderliche Anzahl der einzusetzenden Fahrzeuge, um bestimmte Systemleistungen zu erlangen, bzw. Anforderungen zu genügen, ließen sich weitergehende Gestaltungsvorschläge in bezug auf die Planung des täglichen Betriebs und auf mögliche Ausbaustufen des Lagers ableiten.

Anzumerken bleibt, daß in einem weiteren Projektabschnitt das erstellte Simulationsmodell dazu genutzt wird, die reale Steuerungs-Software zu testen. Dies geschieht durch eine jeweilige Kombination von Programmmodulen aus beiden Systemen, die über eine TCP/IP-Schnittstelle kommunizieren. Eine Anforderung an das System war aufgrund dieser Planung eine Orientierung der Modularisierung der Modellkomponenten an den Vorgaben der Real-Software, so daß eine solche Kopplung überhaupt realisiert werden kann. Ziel dieser Vorgehensweise ist es, Fehler in der Software frühzeitig aufzudecken und somit die Inbetriebnahmezeit des Hochregallagers zu verkürzen.

SimPlan GmbH
 Siemensstraße 10-12
 63165 Mühlheim/Main
 Tel.: 0 61 08/7 20 80
 Fax: 0 61 08/7 20 98
 E-Mail: info@SimPlan.de
 Internet: <http://www.SimPlan.de>



2: Vergleich der Reaktionszeit bei Einsatz von 12, 16 und 24 Bediengeräten

◆ 12 Bediengeräte, ■ 16 Bediengeräte, ▲ 24 Bediengeräte