

Rechnergestützte Planung automatischer Lagersysteme

Thomas Atz, M.Sc., Prof. Willibald A. Günthner

Technische Universität München

Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik fml

Forschungsprojekt "Integrierte Lagersystemplanung" - Zusammenführung von Berechnungsmodellen für Lagergeometrie, Umschlagsleistung und Investitionsaufwand - Entwicklung eines Optimierungsalgorithmus - Implementierung eines Rechnerwerkzeugs für Erzeugung, Dimensionierung und Vergleich von Planungsvarianten - Erweiterung des Suchraums um das wirtschaftlich optimale Lagersystem

Im Rahmen des Forschungsprojekts „*Integrierte Lagersystemplanung*“ wird eine neue Planungsvorgehensweise entwickelt, die den Planer in der Ausarbeitung und den Vergleich von Planungsvarianten für automatische Lagersysteme unterstützt. Dazu werden Modelle entwickelt, welche es ermöglichen, die Einflüsse unterschiedlicher Lagerkonfigurationen und Lagerstrategien auf die Umschlagsleistung zu berechnen und den Investitionsaufwand zur Realisierung der Planungsvariante zu schätzen. Die Berechnungsergebnisse bilden die Ausgangsbasis für eine automatische Dimensionierung der Varianten. Eine mathematische Optimierung ermittelt dazu die Ausführungsform mit dem minimalen Investitionsaufwand und berücksichtigt dabei die Restriktionen zur minimalen Stellplatzanzahl und Umschlagsleistung. Die entwickelten Modelle werden in ein rechnergestütztes Planungswerkzeug übertragen, welches eine Oberfläche zur Eingabe der Planungsvorgaben und darauf aufbauender Planungsvarianten bereit stellt.

1 Einleitung

Automatische Lagersysteme, welche mit schienengeführten Regalbediengeräten betrieben werden, können im Allgemeinen in drei Kategorien untergliedert werden: Automatische Palettenhochregallager (HRL) werden für schweres Lagergut, welches sich häufig auf EURO- oder Industriepaletten befindet, verwendet und erreichen mitunter sehr große Höhen. Automatische Kleinteilelager (AKL) werden bei leichten und relativ kleinen Ladeeinheiten (LE) eingesetzt und wesentlich niedriger ausgeführt. Tablarlager sind eine Unterform bei welcher Tablare als Ladehilfsmittel, auf welchen mehrere Lagergüter angeordnet sein können, benutzt werden.

Die Planung solcher Systeme ist von mehreren Einflussfaktoren abhängig. Neben dem Platzbedarf, der Stellplatzanzahl und der Umschlagsleistung ist vor allem auch der Investitionsaufwand ein entscheidendes Planungskriterium. Die herkömmliche Planungsvorgehensweise dieser Lagersysteme ist sequenziell und bedingt eine getrennte Betrachtung dieser Planungskenngrößen. Dabei wird zunächst ein Groblayout erarbeitet, das eine ausreichende Anzahl an Stellplätzen vorsieht und welches in einem zweiten Schritt bezüglich der Umschlagsleistung bewertet wird. Bei komplexeren Lagerkonfigurationen oder der Verwendung von Lagerstrategien fehlen jedoch häufig geeignete Berechnungsmodelle. Nach der Bestimmung der Stellplatzkapazität und der Umschlagsleistung werden der Investitionsaufwand abgeschätzt und, bei schlechter Wirtschaftlichkeit, in iterativen Schritten Änderungen am Layout oder der technischen Ausführung vollzogen. Diese Vorgehensweise erfordert Ex-

pertise und Erfahrung vom Planer und verursacht einen hohen Aufwand, um das Leistungs- und Kostensoptimum einer Planungsvariante zu finden. Aus Zeit- und Kostengründen werden deshalb meist nur einige wenige technische Varianten untersucht.

Das Forschungsprojekt „Integrierte Lagersystemplanung“ [1] verfolgt das Ziel, den Planer mittels einer neuen ganzheitlichen Planungsvorgehensweise in der Grobplanungsphase zu unterstützen. Die Vorgehensweise wird in einem Rechenwerkzeug umgesetzt, welches es erlaubt, mit geringem Zeitaufwand eine große Bandbreite an teilweise auch komplexen Planungsvarianten zu betrachten und miteinander zu vergleichen.

2 Rechenwerkzeug zur Unterstützung der Planung automatischer Lagersysteme

Die Planung von Hochregallagern und Automatischen Kleinteilelagern unterteilt sich mit der entwickelten Planungsvorgehensweise in die Definition der Planungsvorgaben und der Ausarbeitung von Planungsvarianten. Die Planungsvorgaben geben die Anforderungen an das Lagersystem wieder und fixieren alle planungsrelevanten Rahmenbedingungen. Zu jeder Planung gibt es im Normalfall mehrere Planungsvarianten, welche den Vorgaben genügen müssen. Das Hauptfenster des Rechenwerkzeugs gliedert sich dazu in zwei Bereiche (Abbildung 1). Im linken Bereich werden die planungsrelevanten Daten dargestellt und eingegeben. Im rechten Bereich werden unterschiedliche Planungsvarianten angelegt und miteinander verglichen.

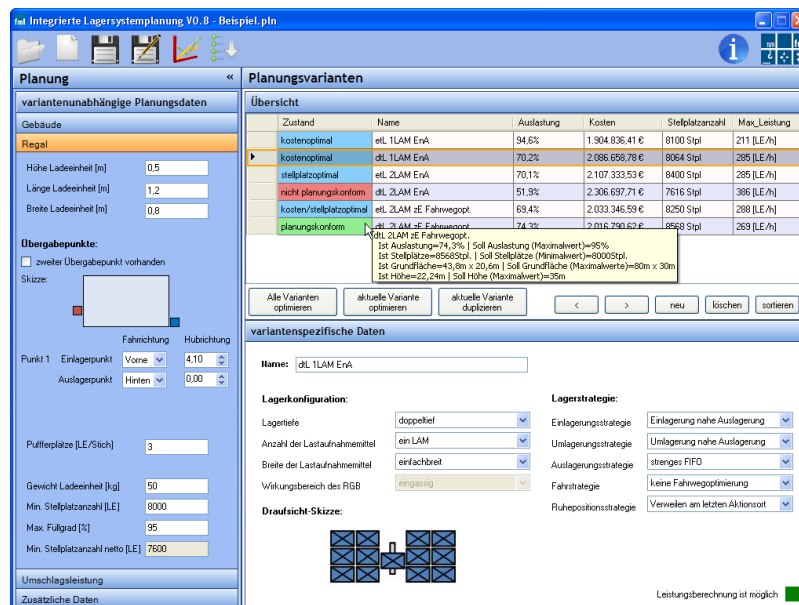


Abbildung 1: Hauptfenster des Planungswerkzeugs für die Definition der Planungsdaten und Planungsvarianten

Die Planungsdaten beinhalten die Gebäudedaten wie die maximal zur Verfügung stehende Länge, Höhe und Breite, die Abmessungen der zu lagernden Ladeeinheiten, die minimal benötigte Stellplatzanzahl, die Lage der Übergabepunkte und die maximal auftretenden Materialflüsse über die Übergabepunkte. Alle Planungsvarianten müssen diesen Planungsdaten genügen um gültig zu sein. Die Varianten unterscheiden sich in Lagerkonfiguration, -strategie und Dimensionierung. Die Lagerkonfiguration beschreibt den physischen Aufbau des Lagers und die Lagerstrategie den operativen Ablauf der Arbeitsspiele der Regalbediengeräte. Die Dimensionierung bestimmt die Ausführungsgröße der Planungsvariante. Die Varianten werden im Hauptfenster tabellarisch aufgelistet und können über die Parameter Auslastung, Investitionsaufwand, Stellplatzanzahl und maximale Umschlagsleistung miteinander

verglichen werden. Jede Planungsvariante kann einzeln genauer betrachtet und dimensioniert werden. Eine mathematische Optimierung ermöglicht die automatische Dimensionierung und mittels Sensitivitätsanalysen können die Auswirkungen von veränderten Planungsdaten auf das optimal ausgelegte Lager untersucht und visualisiert werden.

3 Erstellen einer Planungsvariante

Neue Planungsvarianten werden mit Hilfe des Planungswerkzeugs angelegt. In einem ersten Schritt werden dazu die Lagerkonfiguration und die Lagerstrategien ausgewählt, abschließend kann die Variante dimensioniert werden.

3.1 Lagerkonfiguration

Der physische Aufbau des Lagers wird von der Lagerkonfiguration beschrieben. In den vergangenen Jahrzehnten ist eine Vielzahl an Lagerkonfigurationen entstanden, die den unterschiedlichen Anforderungen der modernen Logistik gerecht werden. Wichtige Lagerkonfigurationen sind in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Übersicht wichtiger Lagerkonfigurationsparameter und Ausprägungsmöglichkeiten

Lagerkonfigurationsparameter	Ausprägungsformen		
Lagertiefe	einfachtief		doppeltief
Anzahl Lastaufnahmemittel pro RBG	1	2	3
Lastaufnahmemittel- / Gassenbreite ¹	einfachbreit		doppelbreit
Wirkungsbereich des RBG	eingassig		mehrgassig
Anzahl Übergabepunkte pro Gasse	2	3	4
Lage der Übergabepunkte	in einem Eckpunkt des Regals		in x- oder y-Richtung verschoben

Eine einfache und oft realisierte Lagerkonfiguration ist das einfachtiefe Lager, das von gassengebundenen Regalbediengeräten (RBG) mit jeweils einem einfachfachbreiten Lastaufnahmemittel (LAM) bedient wird. Je nach Anforderung bezüglich Lagerkapazität und Durchsatzleistung kommen abgewandelte Konfigurationen zum Einsatz. Mit doppeltiefen Lagerformen werden mehr Stellplätze bezogen auf das Lagervolumen realisiert, Mehrfachlastaufnahmemittel ermöglichen eine höhere Umschlagsleistung und kurvengängige RBG zur Bedienung von mehreren Gassen werden bei geringer benötigter Leistung verwendet.

3.2 Lagerstrategie

Jede Lagerkonfiguration kann mit mehreren Lagerstrategien betrieben werden, an denen sich der operative Ablauf der Arbeitsspiele orientiert. Diese Strategien bestimmen die Lagerplatzvergabe und das konkrete Verhalten eines RBG beim Zugriff auf Ladeeinheiten und sind i.d.R. auf die Lagerkonfiguration abgestimmt. Die Strategien werden an dieser Stelle nach ihrem Zeitpunkt der Einflussnahme im Arbeitsspiel gegliedert (Tabelle 2).

¹ auch als Gassentiefe bezeichnet

Tabelle 2: Übersicht wichtiger Lagerstrategien und Ausprägungsmöglichkeiten

Lagerstrategien	Ausprägungsformen			
Spielart / Bewegungsstrategie	reines Einlagerspiel		reines Auslagerspiel	kombiniertes Ein- und Auslagerspiel
Ruhepositionsstrategie	Verweilen am letzten Aktions- ort	Rückkehr zum ÜE ² beim Ein- lagerspiel - Verweilen am ÜA ³ beim Aus- lagerspiel und kombinierten Spiel	Rückkehr zum ÜE	Fahrt in die Regalgasse
Einlagerstrategie	zufällige Einla- gerung ⁴	Einlagerung nahe Auslage- rung	zonierte Einla- gerung (ABC)	Doppeleinlage- rung nahe Aus- lagerung
Auslagerstrategie	strenges FIFO		abgeschwächtes FIFO	
Umlagerstrategie	keine Umlagerung	zufällige Umlagerung	Umlagerung nahe Auslagerung	
Übergabepunktstrategie	getrennte Abgabe und Aufnahme		parallele Abgabe und Aufnahme	
Reihenfolgestrategie	keine Reihenfolgestrategie		Fahrwegoptimierung	

Für die Praxis relevante Einlagerstrategien sind beispielsweise die *zufällige Einlagerung*, bei welcher eine einzulagernde Ladeinheit in ein zufällig bestimmtes freies Lagerfach eingelagert wird, und die *Einlagerung nahe Auslagerung*, bei der das Einlagerfach möglichst nahe am nächsten Auslagerfach gewählt wird, um Fahrwege einzusparen.

Umlagerstrategien werden im doppeltiefen Lager notwendig, wenn auf eine verdeckt stehende Ladeinheit zugegriffen werden muss. In diesem Fall wird zuerst die vordere Ladeinheit in ein anderes Lagerfach umgelagert.

Bei den Auslagerstrategien kommt in der Praxis meist ein *strenges FIFO*⁵ zum Einsatz, um einer Überalterung des Lagerbestandes vorzubeugen. In einigen Branchen wird dieses Prinzip aufgeweicht und Artikel einer gemeinsamen Charge werden bei einer Auslagerung gleichberechtigt behandelt. Für das RBG ergibt sich somit ein Einsparpotenzial durch eine *Fahrwegoptimierung* und einen geschickten Zugriff auf Artikel. Weitere Reihenfolgestrategien können angewendet werden, wenn das RBG mehrere LAM besitzt.

3.3 Dimensionierung

Sind die Lagerkonfiguration und die Lagerstrategien fixiert, kann die geometrische Ausdehnung eines Lagersystems festgelegt werden. Die Parameter hierfür sind die Anzahl der Regalspalten und Regalebenen, die Anzahl der Lagergassen sowie das Verwendung findende Regalbediengerät.

² Aufnahmepunkt des RBG

³ Abgabepunkt des RBG

⁴ auch als chaotische Lagerung bekannt

⁵ FIFO (First In First Out) bedeutet, dass der älteste Artikel zuerst ausgelagert wird.

4 Berechnung einer Planungsvariante

Die Berechnung eines automatischen Lagersystems erfolgt in drei aufeinander aufbauenden Schritten. Zunächst wird die Lagergeometrie einer Planungsvariante bestimmt und die Stellplatzanzahl abgeleitet. Anschließend wird die Umschlagsleistung berechnet und der Investitionsaufwand abgeschätzt. Das Rechenwerkzeug greift dabei auf eine Datenbank zu, in welcher die Kosten- und Leistungsdaten sowie die geometrischen Eigenschaften der einzelnen Lagerkomponenten hinterlegt sind. Diese Datenbank kann vom Planer gepflegt und erweitert werden. Je größer die Anzahl an hinterlegten Datensätzen ist, umso genauer und umfangreicher werden die Planungsvarianten aufgelöst und berechnet. Die Berechnung erfolgt in Echtzeit parallel zu den Benutzereingaben. Ergebnisse und Kennzahlen werden im Werkzeug visualisiert.

4.1 Berechnung der Lagergeometrie

Der physische Aufbau eines automatischen Lagersystems wird durch die eingesetzten Lagerkomponenten und die Dimensionierung, welche die räumliche Ausdehnung beschreibt, bestimmt. Zur Berechnung der Lagergeometrie müssen die für die Planungsvariante am besten geeigneten Komponenten identifiziert werden. Das Rechenwerkzeug wählt dazu aus der Datenbank die für das Lagergebäude technisch geeigneten und gleichzeitig kostengünstigsten Lagerkomponenten aus. Die Bodenplatte, auf welcher das Gebäude steht, wird beispielsweise in Abhängigkeit der notwendigen Traglast ausgewählt. Auf der Bodenplatte verankert setzen die Regalkonstruktion und die Fahrschienen der RBG auf. Eine eventuelle Sprinkleranlage ist häufig in das Regalsystem integriert. Sowohl das Regalsystem als auch die Rohrleitungen der Sprinkleranlage werden durch die Bauhöhe in ihrer Ausführung beeinflusst. Die Steher eines Regals müssen beispielsweise bei großen Regalhöhen und/oder hohen Lasten massiver ausgeführt sein, um die resultierenden Kräfte aufnehmen zu können. Die Lagergassen sind über Übergabepunkte und Pufferstrecken an die Lagervorzone angebunden. Das gesamte Lagersystem wird von Wänden und einem Dach abgeschlossen. Die Systemgrenze wird bei der Anbindung der Lagergassen an die Fördertechnik der Lagervorzone gezogen. Über die Geometriedaten der Lagerkomponenten werden die Lagerabmessungen und die darin realisierbare Stellplatzanzahl berechnet. Die aufgelöste Planungsvariante mit ihren Lagerabmessungen ist die Ausgangsbasis für die weiteren Berechnungen.

4.2 Berechnung der Umschlagsleistung

Die Umschlagsleistung beschreibt die Anzahl der Ein- und/oder Auslagerungen je Zeiteinheit. Sie ist in automatischen Lagersystemen von der Anzahl der RBG und von der Arbeitsspieldauer abhängig. Eine präzise Schätzung der Leistungsfähigkeit eines Lagersystems ist das Fundament einer genauen Planung und verhindert Über- oder Unterdimensionierung, die zu hohen Investitions- oder Folgekosten führen können.

Das in dem Rechenwerkzeug implementierte Berechnungsmodell kann wichtige Lagerkonfigurationen (vgl. mit 3.1) abbilden und verschiedenste Lagerstrategien (vgl. mit 3.2) in die Berechnung integrieren. Das Modell basiert auf einer Zusammenstellung von Spielzeitkomponenten, welche die elementaren Zeitbausteine eines Arbeitsspiels darstellen. Diese Bausteine werden mittels analytisch-stochastischer und analytisch-deterministischer Modelle berechnet. Neben den Rechenmodellen aus den VDI- und FEM-Richtlinien [2,3] finden dazu Modelle aus mehreren internationalen Veröffentlichungen Anwendung [4,5,6]. Das Werkzeug führt diese Modelle zusammen und erweitert sie um fehlende Aspekte. Nach der Berechnung werden die Spielzeitkomponenten zu Arbeitsspielen zusammengefügt. Der Aufbau und Ablauf der Arbeitsspiele hängt wesentlich von der Lagerkonfiguration und den verwendeten

Lagerstrategien ab. Im doppeltiefen Lager werden Teile des Arbeitsspiels (z.B. Umlagerungen) nur mit bestimmten Wahrscheinlichkeiten durchgeführt, welche in Abhängigkeit des Lagerfüllgrads berechnet werden. Für die anfallenden Materialflüsse werden die entsprechenden Arbeitsspiele berechnet und gewichtet [7]. Die dadurch kalkulierte mittlere Spielzeit einer Lagergasse kann dann auf das gesamte Lager hochskaliert werden. Dabei wird der Einfluss von Sequenzstrategien in Form von Abschlagsfaktoren für die Gesamtleistung mit eingerechnet.

4.3 Berechnung des Investitionsaufwands

Eine gute Kostenschätzung ist die Voraussetzung für aussagekräftige Ergebnisse des Werkzeugs. Können die Kosten nicht hinreichend genau geschätzt werden, erfolgt eine ungenaue Dimensionierung und der Vergleich von Planungsalternativen wird verzerrt.

Das Rechenwerkzeug schätzt die Kosten über ein Bottom-Up-Verfahren. Diese werden dabei über die Summe aller Einzelteile, den Lagerkomponenten, berechnet. Dadurch wird eine detaillierte und differenzierte Schätzung ermöglicht, welche beim Variantenvergleich ihre Aussagekraft beibehält. Die Basis bilden die bei der Lagergeometrieberechnung identifizierten Lagerkomponenten. Aus der Datenbank gehen neben ihren technischen Daten die zugehörigen Kostensätze hervor. Die Berechnung umfasst den Investitionsaufwand für das Grundstück, das Gebäude, die technischen Anlagen und den IT-Aufwand.

Der Investitionsaufwand für das Gebäude setzt sich beispielsweise aus Preisen für die Bodenplatte, die Wände und das Dach zusammen. Die Kosten der Lagertechnik ergeben sich aus den Kosten für Regal, Regalbediengeräte, Brandschutz, Übergabepunkte und sonstige Fördertechnik. Der Investitionsaufwandsschätzung für das IT-System liegen die Kosten der einzelnen Module eines Lagerverwaltungssystems zugrunde.

Zur Berechnung der laufenden Kosten werden für die verbauten Kostengruppen prozentuale Aufschlagswerte auf den Investitionsaufwand bestimmt. Über diese Werte werden die Wartungs- und die Energiekosten des automatischen Lagersystems angenähert.

5 Optimierung einer Planungsvariante

Für die Optimierung der Planungsvarianten können unterschiedliche Optimierungsalgorithmen eingesetzt werden. Das vorliegende Problem bezieht sich auf eine nichtlineare unstetige Funktion. Die Veränderlichen sind dabei die Länge, Höhe, Breite und das verwendete RBG. Aus der Anzahl der Parameter ergibt sich die Mehrdimensionalität des Optimierungsproblems. Die Zielfunktion ist der Betrag des Investitionsaufwands, sie kann aber auch wahlweise der Betrag des Verhältnisses der Kosten zur Umschlagsleistung oder zur Stellplatzanzahl sein. Die Nebenbedingungen sind die Umschlagsleistung, die Stellplatzanzahl, die Abmessungen der Lagerhalle etc. Für eine gültige Planungsvariante müssen sämtliche Nebenbedingungen, die sich aus den Planungsvorgaben ergeben, erfüllt sein. Unter anderem durch die Notwendigkeit der Verwendung diskreter Parameter erzielen verschiedene Optimierungsalgorithmen keine zufriedenstellenden Ergebnisse im Vergleich mit der vollfaktoriellen Suche. Bei dieser Methode werden sämtliche Parameterkombinationen durchgetestet. Um die Anzahl der Funktionsauswertungen zu reduzieren, wird ein Branch and Bound Verfahren eingesetzt. Mit Hilfe dieses Verfahrens können Teiläste der Optimierung verworfen und Rechenzeit eingespart werden. Die Teiläste werden nicht mehr betrachtet, wenn sie mit Sicherheit suboptimal sind. Eine solche Schlussfolgerung kann beispielsweise bei einer Parameterkonfiguration mit einem teureren und gleichzeitig langsameren RBG als dem momentan Optimalen gezogen werden. Weitere Rechenzeit wird durch eine schrittweise Berechnung der Nebenbedingungen eingespart. Bei Nichterfüllung einer Bedingung wird die

Parameterkonfiguration verworfen und nicht weiter betrachtet. Die vollfaktorielle Suche wird auf dem verwendeten Testrechner im Zehntelsekundenbereich durchgeführt. Als Ergebnis werden alle relevanten Informationen zu den gefundenen Optimalstellen ausgegeben. Zusätzlich wird der gesamte gefundene Lösungsraum grafisch in einem Diagramm dargestellt (Abbildung 2).

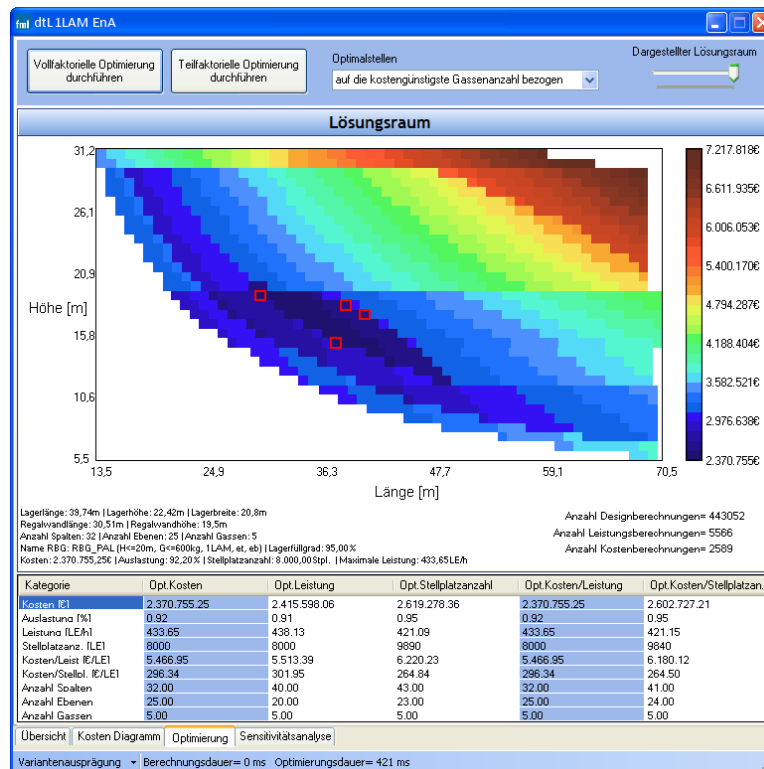


Abbildung 2: Graphische Visualisierung des Lösungsraums und der Ausgabe der Optimalstellen

Dieses zeigt für jede gültige Lösung die Regallänge und Regalhöhe, die günstigste Gassenanzahl mit dem am besten geeigneten RBG und den resultierenden Investitionsaufwand. Die Lösungen sind je nach Investitionsaufwand unterschiedlich eingefärbt. Ähnlich gute Lösungen können somit vom Planer einfacher gefunden und betrachtet werden. Neben dem globalen Minimum können auch lokale Minima attraktive Lösungen für die Lagerauslegung darstellen.

6 Vergleich mehrerer Planungsvarianten

Wesentlich schneller als die vollfaktorielle Suche ist eine teilfaktorielle Suche, bei welcher sich eine spezielle Funktionseigenschaft der Zielfunktion zunutze gemacht wird. Diese besitzt in den Bereichen, in welchen die geforderte Stellplatzanzahl genau erreicht oder nur wenig überschritten wird, lokale Optimalstellen. Werden diese Stellen gezielt durchsucht, wird das globale Optimum ebenfalls zuverlässig identifiziert und die Anzahl der notwendigen Funktionsauswertungen deutlich reduziert. Diese Methode wird unter anderem bei der Durchführung von Sensitivitätsanalysen eingesetzt. Bei diesen Parameterstudien werden die Auswirkungen von veränderten Planungsdaten auf ein optimal dimensioniertes Lager untersucht. Es ist möglich, die Auswirkungen unterschiedlicher Größenbeschränkungen, steigender oder fallender Leistungsanforderungen bzw. anderer Stellplatzanforderungen zu untersuchen und zu visualisieren. In der Regel stellt sich eine sprungfixe Kostenfunktion für das optimal dimensionierte Lager ein. Erst ab einer genügend großen Änderung einer Planungsanforderung variiert das kostenoptimale Lager. Für eine gefundene Lösung kann damit die

Robustheit bezüglich leicht veränderter Rahmenbedingungen gefunden werden. Für alternative Varianten, welche sich in Lagerkonfigurationen und/oder -strategien unterscheiden, können einfach und schnell geeignete Einsatzbereiche erkannt und in die Auswahl mit einbezogen werden.

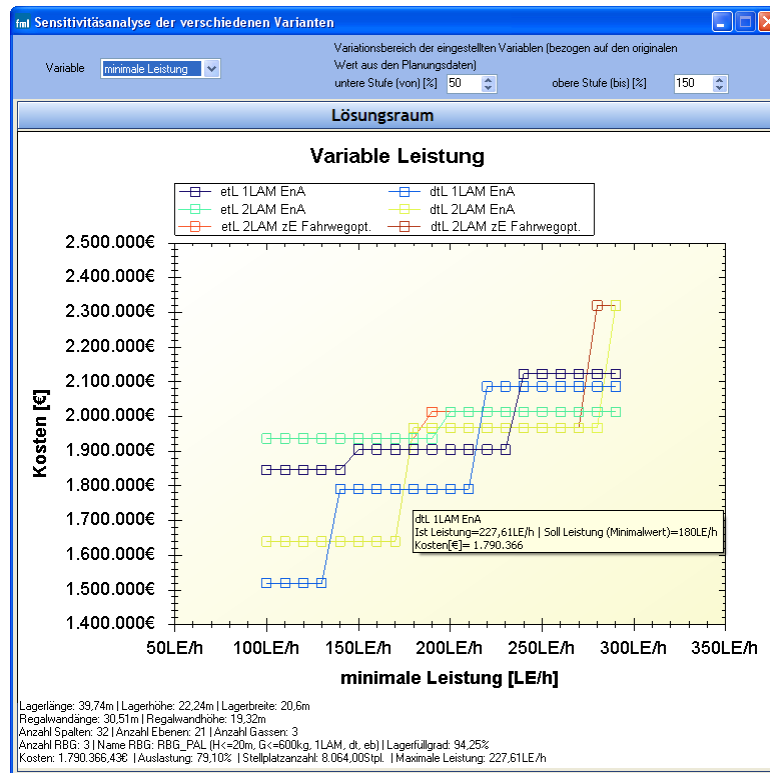


Abbildung 3: Sensitivitätsanalyse mehrerer Planungsvarianten

7 Fazit

Im Rahmen des Forschungsprojekts „Integrierte Lagersystemplanung“ wird eine neue Planungsvorgehensweise entwickelt, die den Planer in der Ausarbeitung und dem Vergleich von Planungsvarianten für automatische Lagersysteme unterstützt. Die Methode ermöglicht es, die Einflüsse unterschiedlicher Lagerkonfigurationen und Lagerstrategien auf die Umschlagsleistung zu berechnen und parallel dazu den Investitionsaufwand zur Realisierung zu schätzen. Verglichen mit der herkömmlichen Planungsvorgehensweise wird dadurch ein wesentlich größerer Suchraum abgedeckt. In einem rechnergestützten Werkzeug erfolgt die Eingabe der Planungsdaten, die Erstellung von Planungsalternativen und die Berechnung dieser. Im Hintergrund wird dazu auf eine Datenbank mit Kosten- und Leistungsdaten der Lagerkomponenten zugegriffen. Über eine Optimierungsfunktion werden Planungsvarianten optimal dimensioniert. Unwirtschaftliche Lösungen können somit schnell erkannt und sinnvolle Planungsvarianten näher betrachtet werden. Der Planer profitiert durch die Möglichkeit des einfachen und schnellen Vergleichs unterschiedlichster technischer Lösungen für einen spezifischen Anwendungsfall.

8 Literatur

[1]

Günthner, W. A.; Atz, T.; Ulbrich, A.: Integrierte Lagersystemplanung. Abschlussbericht, Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik Technische Universität München, München, 2011

- [2] VDI 3561:1973-07: Testspiele zum Leistungsvergleich und zur Abnahme von Regalförderzeugen. VDI-Gesellschaft Produktion und Logistik
- [3] FEM 9.851:2003: Leistungsnachweis für Regalbediengeräte. Fédération Européenne de la Manutention
- [4] Bozer, Y. A.; White, J. A.: Travel-Time Models for Automated Storage/Retrieval Systems. In: IIE Transactions, 16 (1984) 4, S. 329-338
- [5] Lippolt, C. R.: Spielzeiten in Hochregallagern mit doppeltiefer Lagerung. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau Universität Karlsruhe, Karlsruhe, 2003
- [6] Seemüller, S.: Durchsatzberechnung automatischer Kleinteilelager im Umfeld des elektronischen Handels. Dissertation, Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik Technische Universität München, München, 2006
- [7] Atz, T.; Günthner, W. A.: Integrierte Lagersystemplanung. In: 7. Fachkolloquium der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Technische Logistik (WGTL) 2011, S. 64-84