

Layoutgenerierung und Geometrieberechnung für die systematische Planung manuell bedienter Lagersysteme

Layout generation and geometry calculation for methodical planning of manually operated storage systems

Tobias Staab
Willibald A. Günthner

*Lehrstuhl für Fördertechnik, Materialfluss, Logistik
Fakultät für Maschinenwesen
Technische Universität München*

Im vorliegenden Beitrag wird ein Modell für die Beschreibung und Berechnung der Geometrie manuell bedienter Lagersysteme entwickelt und validiert, welches die Grundlage für eine rechnergestützte Planungssystematik bildet. Der modulare Aufbau des Modells ermöglicht durch entsprechende Erweiterungen die Berechnung des Lagerplatzbedarfs unter Berücksichtigung von Lagerstrategien. Auch die Betrachtung von Speziallösungen wie der Verwendung unterschiedlich hoher Lagerplätze ist möglich. Abschließend wird das vorgestellte Modell auf seine Anwendbarkeit zur systematischen Erzeugung verschiedener Layouts als Lösungsalternativen untersucht.

[Schlüsselwörter: Planung von Lagersystemen, manuell bediente Lagersysteme, Layoutplanung]

The paper at hand presents an approach to modelling and calculating the geometry of manually operated storage systems. Due to the model's modular structure, an extension to calculate the demand of bin locations is integrated. In addition, advanced layout solutions are included, e.g. shelves for variably sized load units. The model is validated by comparing its results to examples from industrial practice, whereby it can be used for computer-based planning. Finally, the model is analyzed with regard to its applicability to a systematical generation of different layout solutions.

[Keywords: Planning of storage systems, manually operated storage systems, layout planning]

1 BEDEUTUNG DES PLANUNGSPROZESSES FÜR DIE ERRICHTUNG VON LAGERSYSTEMEN

Die Lagerung von Gütern stellt eine der Grundfunktionen der physischen Logistik dar. Die Gründe für die Einrichtung von Lagern entlang einer Logistikkette können dabei unterschiedlich sein. So lassen sich beispielsweise

Prozesse durch die Einführung dazwischen liegender Puffer entkoppeln. Weiterhin können Lager dazu dienen, Güter zur Sicherstellung der Lieferfähigkeit zu bevorraten oder die benötigte Zeit für Strukturveränderungen des Lagerguts zu überbrücken [AF09; Gud10; HS10]. Auf Grund der Vielzahl an Anwendungsfällen sowie der unterschiedlichen Beschaffenheit des Lagerguts existieren zahlreiche Ausprägungsformen von Lagersystemen. Aus unternehmerischer Sicht ist es wichtig, für einen bestimmten Anwendungsfall die richtige Systemausprägung auszuwählen. So kommen automatisierte Systeme wie Shuttle-Lager oder Hochregallager mit Regalbediengeräten auf Grund der hohen Investitionen vor allem bei hohen Umschlagsleistungen zum Einsatz, weisen jedoch eine vergleichsweise geringe Flexibilität auf. Im Gegensatz dazu eignen sich manuell bediente System bei hoher benötigter Flexibilität sowie geringen Umschlagsleistungen. Die Folgen falscher Auswahl und falscher Dimensionierung eines Lagersystems können schwerwiegend sein und sich in erhöhten Kosten durch benötigte Um- und Erweiterungsplanungen oder nicht optimalen Betrieb zeigen. Der Planung von Lagersystemen kommt daher eine bedeutende Rolle zu.

2 GRUNDLAGEN DER PLANUNG MANUELL BEDIENTER LAGERSYSTEME

Allgemein umfasst Planung alle Maßnahmen und Überlegungen, die dazu dienen, aus verschiedenen Alternativen zur Lösung eines Problems diejenige zu finden, welche im Hinblick auf ein bestimmtes Ziel am besten geeignet ist [Ada96]. Zusätzlich wird der Planungsprozess durch ein systematisches und rationales Vorgehen charakterisiert, welches aus zwei Phasen besteht. Die erste qualitative (kreative) Phase dient dem Auffinden von Lösungsalternativen. In der folgenden quantitativen Phase werden die gefundenen Lösungen hinsichtlich ihres Potenzials zum Erreichen des Planungsziels untersucht und bewertet [Ada96; KS04]. Diese Phasen finden sich auch in Planungsansätzen für Materialfluss- und Lagersysteme

[All99; Gud10] sowie in der industriellen Praxis wieder [SG15]. Zu Beginn der Planung werden mögliche verschiedene Lagersysteme als Lösungsalternativen grob konzipiert und mit fortschreitender Ausgestaltung bewertet. Die Ausgestaltung besteht dabei aus den rekursiv durchgeführten Schritten der Geometrieberechnung, Durchsatzberechnung und Wirtschaftlichkeitsbewertung.

Auch die im IGF-Projekt "OptiMAL - Optimale Planung manueller Lagersysteme" zu entwickelnde Planungssystematik basiert auf diesen Planungsansätzen (Abbildung 1). Durch die rechnergestützte Vorgehensweise soll dabei gewährleistet sein, dass der Lösungsraum – die Menge aller gültigen Planungsalternativen – umfassend untersucht und rational bewertet wird. Die Bewertung der erzeugten Lösungsalternativen erfolgt an Hand der jeweils verursachten laufenden Kosten, welche sich additiv aus Flächenbedarf, Personaleinsatz, Regal- und Bedientechnik sowie Gebäudekosten zusammensetzen. Daraus resultiert, dass für jede Lösungsalternative die Schritte Geometrieberechnung, Durchsatzberechnung und Wirtschaftlichkeitsbewertung durchgeführt werden müssen. Für jeden dieser drei Schritte ist daher ein geeignetes Modell zu entwerfen und in die Planungssystematik zu integrieren.

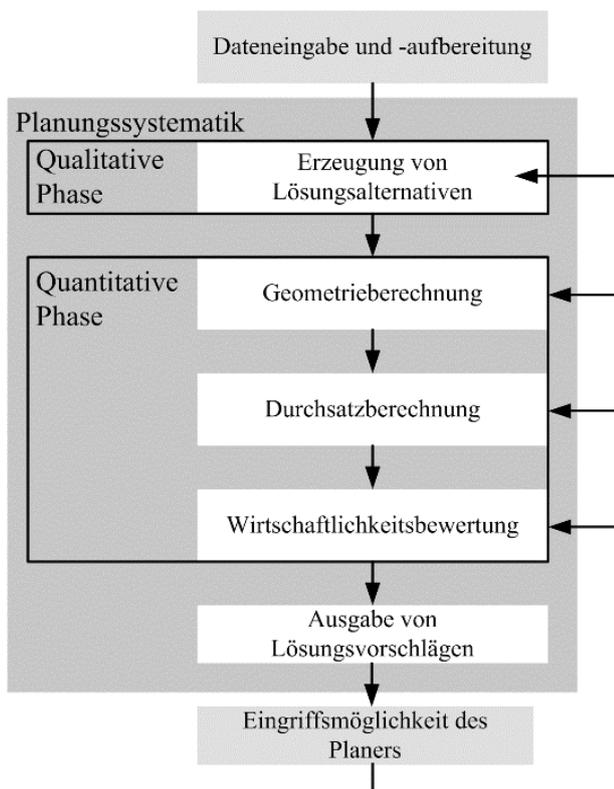


Abbildung 1. Grobkonzept der Planungssystematik

3 WISSENSCHAFTLICHE FRAGESTELLUNG UND VORGEHENSWEISE

In manuell bedienten Lagersystemen kommt eine Vielzahl unterschiedlicher Regaltechnikvarianten zum Einsatz, darunter beispielsweise Palettenregale, Bodenblocklager und Fachbodenregale. Aus der Vielfalt resultiert, dass eine Modellierung zur einheitlichen Beschreibung und Berechnung von Lagerbereichen mit unterschiedlicher Regaltechnik gefunden werden muss. Diese Fragestellung soll mit Hilfe des folgenden Vorgehens gelöst werden:

- Die betrachteten Regaltechnikvarianten werden klassifiziert und auf Gemeinsamkeiten und Unterschiede hin analysiert.
- Basierend auf der Klassifizierung werden alle Daten identifiziert, welche für die eindeutige Beschreibung eines Layouts aus den verschiedenen Regaltechnikvarianten benötigt werden und damit als Eingabedaten dienen. Diese Daten umfassen sowohl Szenario-Eigenschaften, welche der Planer vorgibt, als auch technische Einflussgrößen, die im Rahmen der Planung als Freiheitsgrade gewählt werden können.
- Das Ergebnis der Klassifizierung wird unter Verwendung der Eingabedaten in ein allgemeingültiges, regaltechnikunabhängiges Verfahren zur Geometrieberechnung überführt.

Ein auf diesem Weg aufgestelltes Modell stellt der Durchsatzberechnung und Wirtschaftlichkeitsbewertung benötigte Daten wie die Gassenlänge und Regalhöhe oder den Flächenbedarf zur Verfügung. Es dient also der reinen Bewertung und erfordert die Festlegung aller technischen Einflussgrößen im Voraus. Dies geschieht in der vorangehenden, kreativen Phase [Ada96], in der die Erzeugung von Planungsalternativen durch Variation der technischen Einflussgrößen des Lagersystems erreicht wird.

Die folgenden Ausführungen fokussieren die Frage nach einem geeigneten Modell für die Geometrieberechnung. Die Untersuchung der Frage nach einer systematischen Generierung von Lösungsalternativen soll in Form eines Ausblicks behandelt werden. Zwar ist eine Lösungsalternative durch ihre Geometrie bereits weitgehend beschrieben, sodass die systematische Generierung von Lösungsalternativen zum Großteil in der systematischen Variation der Geometrie besteht. Allerdings ist sie abhängig von der Auswahl eines geeigneten Lösungsverfahrens, beispielsweise durch Überführung des Planungsproblems in ein lineares Optimierungsproblem. Somit lassen sich ohne Kenntnis der Teilmodelle zur Durchsatzberechnung und Wirtschaftlichkeitsbewertung lediglich grundlegende Erkenntnisse aus der Geometrieberechnung ableiten.

4 GEOMETRIEBERECHNUNG IM PROJEKT OPTIMAL

Die von Günthner et al. getroffene Einteilung der technischen Einflussgrößen auf die Ausprägung von Lagersystemen lässt sich gleichermaßen auf automatisierte wie manuell bediente Lagersysteme anwenden [GAU11]:

- Die Lagerkonfiguration bestimmt den physischen Aufbau eines Lagersystems, beispielsweise also die gewählte Regal- und Bedientechnik.
- Lagerstrategien dienen dazu, die Abläufe in einem Lager zu regeln, unabhängig von dessen Konfiguration.
- Die Lagerdimensionierung gibt Aufschluss über die räumliche Ausdehnung und besteht damit in der Festlegung der verschiedenen Freiheitsgrade für die Geometrieberechnung.

Im Mittelpunkt zahlreicher Untersuchungen zur Layoutberechnung und -generierung steht die Frage nach der optimalen Lagerdimensionierung. Verschiedene Modelle beschreiben die Dimensionierung von Lagerbereichen zur Minimierung der Kosten für Gebäude und Umschlag. Als Entscheidungsvariablen der aufgestellten Optimierungsprobleme werden jeweils die Gassenzahl sowie die Gassenlänge verwendet [RR72; BRR80; RR84; RV06]. Die Konfiguration des Lagerbereichs sowie die angewandten Bewegungs- und Belegungsstrategien sind jeweils vorgegeben und fließen in die Zielfunktion ein. Durch die vorgegebene Konfiguration wird der Aufbau des Regals, insbesondere der Lagerplätze, jedoch nicht als Freiheitsgrad berücksichtigt. Daher wird nur ein Teil der Geometrieberechnung und der im Forschungsvorhaben untersuchten Alternativen abgedeckt.

Einen Ansatz ohne Optimierung der Lagerdimensionierung verfolgt Gudehus. Sein Modell dient der Beschreibung eines Lagerlayouts und orientiert sich am physischen Aufbau eines Regalsystems. Grundlage bildet die regaltechnikabhängige Definition eines Lagerplatzes, welcher sich aus mehreren Stellplätzen zusammensetzt. Schrittweise werden daraus Fachmodule, Gangmodule und zuletzt Lagermodule aufgebaut. Als Ergebnis dieser sogenannten statischen Lagerdimensionierung liegt ein vollständig beschriebenes Layout vor, welches die Grundlage weiterer Analysen bildet [Gud10].

4.1 GRUNDLEGENDER AUFBAU DER GEOMETRIEBERECHNUNG

Überführt man den Ansatz von Gudehus in einen morphologischen Kasten, lässt sich eine Klassifikation der Lagertechnikvarianten ableiten (Abbildung 2). Für jedes Modul (Lagerplatz, Fachmodul, Gangmodul und Lagermodul) gibt es in dieser Klassifikation verschiedene Ausprägungsformen, sodass sich alle betrachteten Regaltechnikvarianten

einordnen lassen. Ein Lagerbereich aus Einschubregalen ergibt sich beispielsweise durch Verwendung kanalformiger Lagerplätze. Die Gangmodule bestehen aus zwei einseitig bedienten Regalzeilen und einem dazwischen liegenden Bediengang. Ein Durchfahrregal besteht dagegen aus schluchtförmigen Lagerplätzen, die zweiseitig bedient werden, sodass das Gangmodul eine Regalzeile sowie zwei Bediengängen beinhaltet.

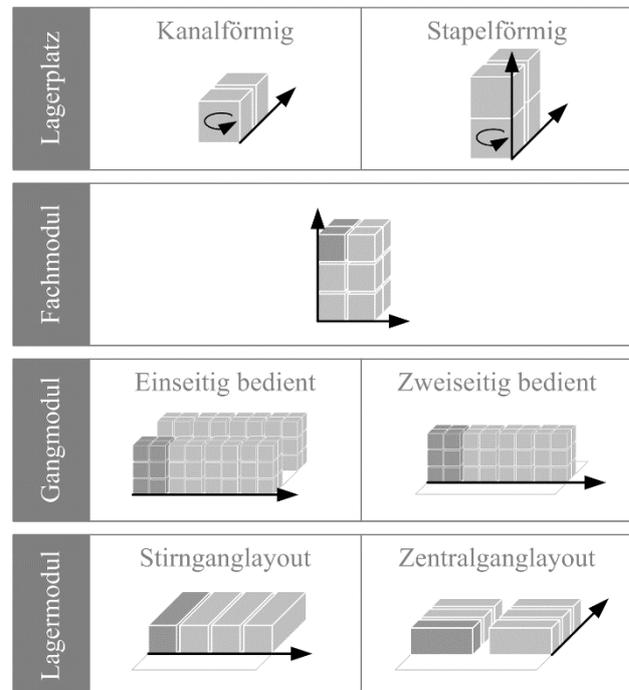


Abbildung 2. Morphologischer Kasten der Regalmodule

Die technischen Einflussgrößen sind in (Abbildung 2) jeweils durch Pfeile kenntlich gemacht und unabhängig von der Regaltechnik gültig. Sie lassen sich der Lagerkonfiguration, den Lagerstrategien und der Lagerdimensionierung zuweisen:

- Die Lagerkonfiguration umfasst die verwendete Regal- und Bedientechnik, die Stellplatztiefe, die Stapelhöhe der Lagereinheiten (LE) im Lagerplatz, die Einlagerungsrichtung der LE sowie die Layoutgrundform.
- Die Lagerstrategien umfassen die Lagerordnungs- sowie die Einlagerungsstrategie.
- Die Lagerdimensionierung umfasst die Anzahl an Lagerebenen, die Länge der Lagergassen und ihre Anzahl.

Neben den technischen Einflussgrößen lassen sich die weiteren Eingangsdaten ableiten. Sie unterteilen sich in Szenario-Daten, Regaltechnikdaten und Bedientechnikdaten. Die Szenario-Daten charakterisieren den Einsatzfall und beinhalten beispielsweise die Abmessungen der einzulagernden LE oder die Bestandsdaten der verschiedenen Artikel. Die Regal- und Bedientechnikdaten, die für die

Geometrieberechnung nötig sind, beinhalten wichtige Abmessungen, beispielsweise Steher- und Querträgerprofile und die benötigte Arbeitsgangbreite.

Aus dem morphologischen Kasten lässt sich gleichzeitig das allgemeingültige, regaltechnikunabhängige Verfahren zur Layoutberechnung ableiten: Je nach Regaltechnik ist ein Lagerplatz beispielsweise entweder als kanal- oder stapelförmige Anordnung mehrerer Stellplätze definiert. In beiden Fällen müssen die Einlagerungsrichtung (längs oder quer zur Gassenrichtung) sowie die Lagerplatztiefe (Anzahl an Stellplätzen senkrecht zur Regalfront) festgelegt werden. Ein stapelförmiger Lagerplatz erfordert für eine eindeutige Definition zusätzlich die Angabe der Stapelhöhe der LE. Die auf diese Weise definierten Lagerplätze werden matrixförmig, d. h. neben- und übereinander zu einem Fachmodul zusammengesetzt. Die Anordnung von Lagerplätzen nebeneinander ist beschränkt durch die maximal mögliche Traversenlänge. Bei Regaltechnikvarianten mit Regal definiert die Grundfläche des Fachmoduls dadurch auch das Raster der Steher. Die Anzahl an übereinander angeordneten Lagerplätzen entspricht der Anzahl an Lager-ebenen und bestimmt damit die Höhe des gesamten Lagerbereichs. Die Anordnung von mehreren Fachmodulen zu einem Gangmodul wird durch die für jede Regaltechnik eindeutige anteilige Gangzahl [Gud10] sowie die festzulegende Gassenlänge bestimmt. Die anteilige Gangzahl beschreibt das Verhältnis aus Regalzeilen und zugehörigen Lagergassen. Sie nimmt also bei einseitig bedienten Regalen den Wert 1/2 an, bei zweiseitig bedienten Regalen den Wert 2. Die Kombination mehrerer Gangmodule zu einem Lagermodul kann für jede Regaltechnik die zwei Ausprägungsformen Stirnganglayout und Zentralganglayout als Layoutgrundform annehmen, die an verschiedenen Stellen als grundlegende Layoutvarianten verwendet werden [BRR80; Gud10; Sad07]. Für beide Ausprägungen muss zusätzlich die Gassenzahl festgelegt werden. Den Abschluss der Geometrieberechnung bildet die Ableitung von Kapazität und Abmessungen jedes Moduls.

Die gezeigte Klassifizierung ermöglicht also die Einordnung aller betrachteten Regaltechnikvarianten und die eindeutige Beschreibung eines Layouts anhand der Regaltechnik sowie maximal sieben technischen Einflussgrößen. Der schrittweise Aufbau der Geometrie ist zwar allgemein gültig, einige der Regaltechnikvarianten erfordern jedoch zusätzliche Restriktionen, um technisch korrekte Lösungen zu gewährleisten. So besitzen beispielsweise sowohl Palettenregale als auch Einschubregale einen kanal-förmigen Lagerplatz, welcher jedoch beim Palettenregal auf eine maximale Lagerplatztiefe von zwei Stellplätzen (doppeltiefe Lagerung) beschränkt ist. Die technische Korrektheit einer Lösung ist notwendig, jedoch nicht hinreichend für ihre Gültigkeit hinsichtlich des Einsatzfalles. Daher sind unabhängig von der Regaltechnik weitere Restriktionen zu überprüfen. So ist ein Lagerbereich nur dann gültig, wenn die tatsächliche Anzahl an Lagerplätzen über der Anzahl an Lagerplätzen liegt, die zur Einlagerung

der zu erwartenden Menge an LE benötigt wird. Auch die Anpassung an das umgebende Gebäude und die Werk-struktur bilden Restriktionen: Die Abmessungen des Lagerbereichs sind begrenzt durch die Gebäudehöhe sowie die zur Verfügung stehende Fläche.

4.2 BERECHNUNG DER BENÖTIGTEN ANZAHL AN LAGERPLÄTZEN

Im beschriebenen grundlegenden Aufbau der Geometrieberechnung ist die Anzahl an Lagerplätzen eines Lagerbereichs durch die Lagerkonfiguration und Lagerdimensionierung vorgegeben. Zugleich muss die Lagerplatzzahl über einem Mindestwert liegen, der gewährleistet, dass der Lagerbereich eine vorgeschriebene Verfügbarkeit aufweist und in der Lage ist, einzulagernde LE aufzunehmen [AF09].

Diese minimale Lagerplatzzahl ist neben der aus der Lagerkonfiguration resultierenden Lagerplatzkapazität abhängig vom Bestandsverlauf jedes Artikels sowie den Lagerstrategien zur Lagerordnung und Einlagerung. Sie erzeugt also einen Zusammenhang zwischen bisher als voneinander unabhängig betrachteten technischen Einflussgrößen. Diese Abhängigkeit lässt sich bereits bei der Festlegung der Einflussgrößen nutzen, indem zuerst Lagerkonfiguration und -strategien festgelegt werden. Anschließend wird der Lagerplatzbedarf berechnet und bei der Festlegung der Dimensionierung berücksichtigt. Die Gassenzahl ist dann kein frei wählender Parameter mehr, sondern wird so festgelegt, dass sie den kleinsten Wert annimmt, der die benötigte Anzahl an Lagerplätzen im gesamten Lagerbereich noch zur Verfügung stellt:

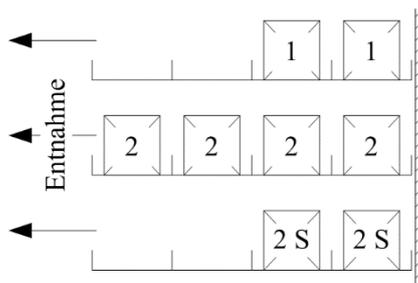
1. Festlegung der Lagerkonfiguration und Lagerstrategien.
2. Berechnung des Lagerplatzbedarfs für alle einzulagernden Artikel aus der Lagerkonfiguration und den Lagerstrategien.
3. Festlegung der Lagerdimensionierung. Dabei Auswahl der Gassenzahl so, dass bei möglichst kleinem Wert der Lagerplatzbedarf noch erfüllt wird.
4. Berechnung der Geometrie (siehe 4.1) mit Prüfung hinsichtlich der Gültigkeit für den Einsatzfall

Zur Berechnung des Lagerplatzbedarfs je Artikel müssen zwei Lagerstrategien vorgegeben sein. Die Lagerordnungsstrategie gibt an, nach welchen Vorgaben freie Lagerplätze durch Einlagerungen belegt werden. Bei fester Lagerordnung ist jeder Lagerplatz für LE eines bestimmten Artikels reserviert. Es werden daher so viele Lagerplätze reserviert, dass der Maximalbestand des Artikels zu jeder Zeit aufgenommen werden kann. Im Gegensatz zur festen Lagerordnung werden bei freier oder chaotischer Lagerordnung leere Lagerplätze freigegeben und können so (jeweils

artikelrein) durch LE unterschiedlicher Artikel belegt sein. Auf diese Weise wird der zeitliche Ausgleich der Bestände einzelner Artikel genutzt, um die Gesamtzahl der benötigten Lagerplätze zu senken und den Lagerfüllgrad zu erhöhen.

Auch die Einlagerungsstrategie hat Einfluss auf die Anzahl der benötigten Lagerplätze. Um zu gewährleisten, dass LE älterer Chargen im direkten Zugriff sind und nicht durch später eingelagerte LE verdeckt werden, erfolgt die Einlagerung einer Charge in leere Lagerplätze. Diese prozessorientierte Einlagerungsstrategie vermeidet Umlagerspiele bei der Einlagerung, führt aber zu einem Stellplatzverlust in den Lagerplätzen der neuen und älterer Chargen. Nimmt man jedoch zusätzliche Umlagerspiele in Kauf, können Lagerplätze durch LE aus neuen und alten Chargen belegt werden. Dadurch senkt die platzorientierte Einlagerungsstrategie den Stellplatzverlust je Artikel. Im gezeigten Beispiel reduziert die platzorientierte Einlagerstrategie den Lagerplatzbedarf von drei auf zwei zum Zeitpunkt der Einlagerung (Abbildung 3).

Prozessorientierte Einlagerung



Platzorientierte Einlagerung

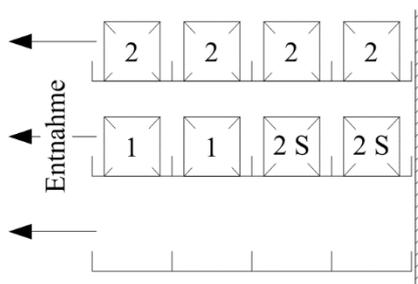


Abbildung 3. Lagerplatzbedarf bei prozess- und platzorientierter Strategie
 (S: Sicherheitsbestand nach Einlagerung; 1: Alte Charge; 2: Neue Charge)

Einen analytischen Ansatz zur Berechnung der benötigten Anzahl an Lagerplätzen mit Berücksichtigung stochastischer Bestandsschwankungen liefern Arnold und Furmans. Der Lagerplatzbedarf wird für eine Lagerplatzkapazität von einer LE unter Berücksichtigung der Lagerordnungsstrategie berechnet [AF09]. Für einen Großteil

der betrachteten Regaltechnikvarianten ist die Lagerplatzkapazität von einer LE allerdings eine starke Einschränkung.

Weitere Modelle zur Layoutgenerierung und Geometrieberechnung setzen den Lagerplatzbedarf als Eingangsgröße voraus [BRR80; RR84; RV06]. Hier bleibt es daher dem Planer überlassen, im Vorfeld die Lagerplatzkapazität festzulegen und diese Berechnung selbst durchzuführen. Sollen die Lagerplatzkapazität sowie die Lagerstrategien im Rahmen der Planung als frei wählende technische Einflussgröße behandelt werden, ist dieser Ansatz jedoch nicht zielführend.

Gudehus beschreibt einen analytischen Ansatz zur Berechnung der benötigten Anzahl an Lagerplätzen für freie und feste Lagerordnung [Gud10]. Er basiert auf einem sägezahnförmigen Bestandsverlauf, wie er für die dispositive Lagerung typisch ist. Kerngedanke des Modells ist die Berücksichtigung des Leerplatzverlusts für jeden Artikel. Er basiert auf der Annahme, dass der Rest der Ganzzahldivision von Bestand und Lagerplatzkapazität gleichverteilt zwischen eins und der Lagerplatzkapazität liegt. Sofern also der mittlere Bestand kein ganzzahliges Vielfaches der Lagerplatzkapazität ist, ist ein Lagerplatz nur zum Teil nutzbar. Die Einlagerungsstrategie wird nicht explizit berücksichtigt, jedoch wird für jeden Artikel genau ein Leerplatzverlust berücksichtigt, was auf platzorientierte Einlagerung schließen lässt. Die prozessorientierte Einlagerstrategie lässt sich berücksichtigen, indem ein Leerplatzverlust sowohl für den Sicherheitsbestand als auch für den Losbestand anfällt. Die Anzahl an benötigten Lagerplätzen je Artikel berechnet sich also wie in Abbildung 4.

Strategie	Lagerplatzbedarf je Artikel
Platzorientiert Frei	$\text{Max}(1; M_B/C_{LP} + (C_{LP}-1)/2 C_{LP})$
Platzorientiert Fest	$\text{Max}(1; M_{B\text{Max}}/C_{LP} + (C_{LP}-1)/2 C_{LP})$
Prozessorientiert Frei	$\text{Max}(1; M_B/C_{LP} + (C_{LP}-1)/C_{LP})$
Prozessorientiert Fest	$\text{Max}(1; M_{B\text{Max}}/C_{LP} + (C_{LP}-1)/C_{LP})$

Abbildung 4. Strategieabhängiger Lagerplatzbedarf nach [Gud10]
 (M_B : Mittlerer Bestand; $M_{B\text{Max}}$: Maximalbestand; C_{LP} : Lagerplatzkapazität)

4.3 BERÜCKSICHTIGUNG UNTERSCHIEDLICHER LAGERPLATZHÖHEN

Das vorgestellte Verfahren zur Geometrieberechnung (Abbildung 2) legt die Abmessungen des Lagerplatzes basierend auf den Abmessungen der LE fest. Sofern in einem Lagerbereich verschiedene LE-Abmessungen eingelagert werden, muss der Lagerplatz nach den maximal auftretenden Abmessungen ausgelegt werden. Für jeden LE-Typ lässt sich daraus die Eignung für diesen Lagerplatz definieren als Verhältnis des LE-Volumens zum Produkt der maximalen Abmessungen:

$$E_{LE} = \frac{V_{LE}}{l_{LE,max} * b_{LE,max} * h_{LE,max}}$$

Je größer der Platzverlust $1-E_{LE}$ ausfällt, desto lohnender kann der Aufbau eines Lagerbereichs aus zwei unterschiedlichen Lagerplatztypen sein. Da häufig LE mit gleicher Grundfläche, jedoch unterschiedlicher Höhe auftreten, besteht eine einfache Möglichkeit zur besseren Raumnutzung in der ebenenweise Variation der Lagerplatzhöhe. Ein Palettenregal lässt sich so beispielsweise an unterschiedlich hohe Ladeeinheiten mit der Grundfläche einer Euro-Palette anpassen.

Mit Hilfe geringfügiger Erweiterungen kann auch ein solcher Lagerbereich mit dem vorgestellten Modell beschrieben und berechnet werden (Abbildung 5 links). Hierfür wird das Fachmodul als Stapel verschieden hoher Lagerebenen definiert. Die Höhe eines Fachmoduls ergibt sich also, indem das Produkt aus Ebenenzahl und Ebenenhöhe für jeden Lagerplatztyp aufsummiert wird. Für die technischen Einflussgrößen bedeutet das, dass die Ebenenzahl je Lagerplatztyp vorgegeben werden muss und die zugehörigen Lagerplatztypen separat konfiguriert werden.

Sofern lediglich die Lagerplatzhöhe variiert wird, sind nur wenige Eingriffe in das Grundmodell nötig. Prinzipiell lassen sich auf demselben Weg jedoch weitere Variationen erzeugen, darunter die Kombination eines Kommissionierbereichs mit einem darüber liegenden Nachschubbereich als Palettenregal (Abbildung 5 rechts). Die beiden Bereiche lassen sich wiederum auf der Ebene des Fachmoduls zusammenführen, indem durch Zwangsbedingungen der Kommissionierbereich in das Steherraster des Palettenregals eingepasst wird. Anschließend werden auf dem bereits bekannten Weg Fachmodule zu Gangmodule und Lagermodulen kombiniert.

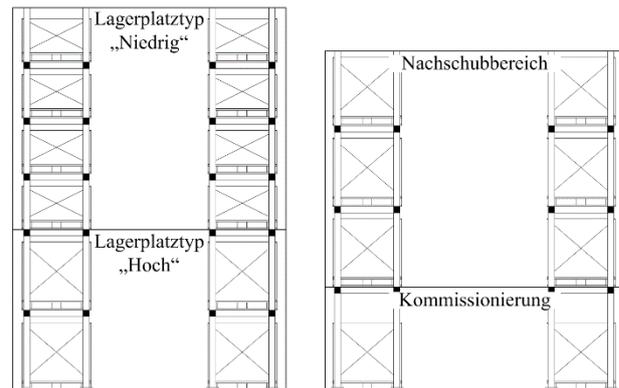


Abbildung 5. Schemazeichnungen zweier Regalvarianten mit unterschiedlich hohen Lagerplätzen (links) und Kombination von Kommissionierung und Nachschub (rechts)

4.4 VALIDIERUNG DES MODELLS ZUR GEOMETRIEBERECHNUNG

Vor dem Einsatz muss die zu erstellende Planungssoftware verifiziert und validiert werden. Die Verifikation weist nach, dass die implementierte Software korrekt funktioniert, indem geprüft wird, ob die Implementierung mit den zu Grunde liegenden Modellen übereinstimmt. Die Validierung dagegen soll zeigen, dass die verwendeten Modelle das Originalsystem hinreichend genau abbilden. Eine Möglichkeit zur Validierung modular aufgebauter Software wird in der Materialflusssimulation häufig angewandt, lässt sich jedoch auch auf die Geometrieberechnung übertragen: das vorgestellte Modell kann als Teilmodell bereits im Vorfeld und ohne Kenntnis des genauen Aufbaus der Planungssystematik verifiziert und validiert werden (sog. "Bottom-Up Testing") [RSW08].

Die Validierung der Geometrieberechnung erfolgt daher durch Anwendung auf geplante und umgesetzte Lagerbereiche, welche gemeinsam mit Projektpartnern ausgewählt wurden. Ziel ist es, bei Verwendung der gleichen Lagerkonfiguration und der gleichen Dimensionierung eine möglichst geringe Abweichung zwischen den Berechnungsergebnissen und der tatsächlichen Geometrie nachzuweisen. Das Palettenregal wurde an fünf Lagerbereichen validiert.

Drei dieser Bereiche bestehen aus jeweils einem Lagerplatztyp und bilden somit den einfachsten Fall der Geometrieberechnung ab. (Abbildung 6) zeigt für diese Lagerbereiche sowohl die Lagerkonfiguration und Lagerdimensionierung als auch weitere Eingangsgrößen sowie die Ergebnisse des Vergleichs mit dem realen Layout. Die Kenntnis der angewandten Lagerstrategien ist nicht nötig, da die Anzahl an benötigten Stellplätzen aus Konfiguration und Dimensionierung folgt. Insgesamt zeigt sich, dass das Modell die realen Layouts sehr gut annähert.

Bereich	1	2	3
Fachmodul	Einfachtief, Dreiplatzsystem		
	8 Ebenen		6 Ebenen
Gassenlänge	21 FM	13 FM	23 FM
Gassenzahl	5	3	1
Lagergut	Euro-Pal. h = 130 cm		Euro-Pal. h = 95 cm
Stellplatzzahl	5040	3276	828
Lagerbereich (L/B/H)	62,7 m 32,0 m 9,4 m	76,0 m 21,8 m 9,5 m	64,7 m 7,3 m 9,2 m
Berechnung (L/B/H)	62,5 m 31,5 m 9,6 m	75,7 m 21,5 m 9,6 m	64,5 m 7,2 m 9,3 m
Mittl. Abweichung	1,1%	1,1%	1,1%

Abbildung 6. Validierungsergebnisse dreier Lagerbereiche mit jeweils einem Lagerplatztyp

In zwei weiteren Lagerbereiche sind zwei Lagerplatztypen kombiniert, die unterschiedlich hohe LE (1200 mm und 600 mm) mit der Grundfläche einer Euro-Palette zusätzlich Überstand aufnehmen können. Für diese beiden Fälle sind die Eingangsdaten und Ergebnisse der Validierung in (Abbildung 7) gezeigt. Sie bestätigen die Ergebnisse der Validierung einfach aufgebauter Lagerbereiche sowie das um unterschiedliche Lagerplatzhöhen erweiterte Modell.

Bereich	1	2
Fachmodul	Einfachtief, Dreiplatzsystem	Einfachtief, Zweiplatzsystem
	H ₁ :4 Ebenen H ₂ : 8 Ebenen	H ₁ :4 Ebenen H ₂ : 10 Ebenen
Gassenlänge	14 FM	12 FM
Gassenzahl	2	6
Lagergut	Euro-Pal. H ₁ = 1200 mm H ₂ = 600 mm	
Stellplatzzahl	2016	4032

Lagerbereich (L/B/H)	44,1 m 13,7 m 12,9 m	37,0 m 22,8 m 14,7 m
Berechnung (L/B/H)	44,7 m 13,4 m 12,9 m	36,4 m 21,9 m 14,7 m
Mittl. Abweichung	1,2%	1,9%

Abbildung 7. Validierungsergebnisse zweier Lagerbereiche mit jeweils 2 Lagerplatztypen

5 EINBINDUNG DES GEZEIGTEN ANSATZES ZUR GEOMETRIEBERECHNUNG IN EINE PLANUNGSSYSTEMATIK

Zusätzlich zu den oben beschriebenen technischen Einflussgrößen mit Auswirkung auf das Layout existieren im Bereich der Durchsatzberechnung weitere, beispielsweise die Bewegungsstrategie der Bedientechnik oder die Lagerplatzbelegungsstrategie, welche sich auf die mittlere zurückzulegende Wegstrecke in einem Lagerspiel auswirken. Da jedoch die Mehrzahl der technischen Einflussgrößen auf den Bereich der Geometrie entfällt, während die Durchsatzberechnung und Wirtschaftlichkeitsbewertung auf die berechnete Geometrie aufbauen und nur wenige Einflussgrößen besitzen, kommt einer systematischen Layoutgenerierung als Grundlage für die Planungssystematik eine große Bedeutung zu. Für die Frage danach, wie eine solche systematische Layoutgenerierung aussehen kann, wird folgende Herangehensweise gewählt:

- Definition der Zielfunktion, anhand derer die erzeugten Lösungen bewertet werden.
- Analyse der Struktur des Lösungsraums
- Analyse der Modelle zur Geometrieberechnung, Durchsatzberechnung und Wirtschaftlichkeitsrechnung zur Auswahl eines geeigneten Lösungsverfahrens des Planungsproblems
- Aufstellen einer Vorgehensweise zur Erzeugung von Lösungsalternativen, welche sich die Struktur des Lösungsraums zu Nutze macht und sich in die Planungssystematik integriert.

Als Zielfunktion zur Bewertung der Lösungsalternativen wird die Minimierung der laufenden Kosten formuliert (vgl. 3). Der Lösungsraum, auf welchen die Zielfunktion angewendet wird, ist definiert als die Menge aller gültigen Lösungsalternativen und bildet damit die Grundlage für die Auswahl der kostenoptimalen Lösung. Soll ein Lagerbereich für ein gegebenes Sortiment erzeugt werden, umfasst der Lösungsraum also alle Lösungsalternativen, die durch Variation der technischen Einflussgrößen erzeugt werden können und die die Restriktionen durch das Szenario und

die verwendete Regal- und Bedientechnik erfüllen. Dabei wurde die Aufteilung des Sortiments auf die verschiedenen Lagerbereiche bisher als gegeben vorausgesetzt. Bei der Planung manuell bedienter Lagersysteme ist diese Zuordnung von Artikeln zu einer geeigneten Lagerkonfiguration und Lagerstrategie jedoch ein weiterer wichtiger Freiheitsgrad. Eine Lösungsalternative umfasst daher in der Regel mehrere Lagerbereiche, in die jeweils ein Teil des durch den Planer vorgegebenen Sortiments eingelagert wird. Um verschiedene Lösungsalternativen in der kreativen Planungsphase nach Adam erzeugen zu können, muss also zuerst eine Gruppierung der Artikel des Sortiments vorgenommen werden. Anschließend müssen für jeden dieser Lagerbereiche unter Berücksichtigung der einzulagernden Artikel unterschiedliche Lagerkonfigurationen, Lagerstrategien und Lagerdimensionierungen untersucht werden. In diesem zweistufigen Vorgehen zeigt sich die Struktur des Lösungsraums, die auf allen möglichen Zuordnungen der N Artikel $1 \dots i$ zu M geplanten Lagerbereichen $1 \dots j$ basiert:

$$x_{ij} = \begin{cases} 1: \text{Artikel in Lagerbereich } j \\ 0: \text{sonst} \end{cases}$$

Dabei muss jeder Artikel genau einem Lagerbereich zugeordnet werden:

$$\sum_{j=1}^M x_{ij} = 1 \quad \forall i=1 \dots N$$

Für jede gültige Zuordnung existieren wiederum je Lagerbereich unterschiedliche Möglichkeiten, Lagerkonfiguration, Lagerstrategien und Lagerdimensionierung miteinander zu kombinieren. Sofern die Kombination technisch korrekt und für den Einsatzfall gültig ist, handelt es sich um eine dem Lösungsraum zugehörige Lösung.

Diese Struktur lässt sich für die Erstellung einer Planungssystematik ausnutzen, indem in einem ersten Schritt versucht wird, die Zuordnung der Artikel zu Lagerbereichen so zu gestalten, dass sich durch anschließende Auswahl der Konfiguration, Strategien und Dimensionierung möglichst gute, das heißt kostengünstige Lagerbereiche ergeben. Die Güte der erzeugten Lagerbereiche wird an den verursachten laufenden Kosten gemessen. Auf Grund der notwendigen Integration der Generierung von Lösungsalternativen in die gesamte Planungssystematik ist jedoch für die Entwicklung des genauen Ablaufs der Planungssystematik zusätzlich die Kenntnis der Modelle für Durchsatzberechnung und Wirtschaftlichkeitsbewertung nötig.

6 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Bei der Planung manuell bedienter Lagersysteme sind zur Ausgestaltung einer Lösungsalternative die Schritte der Geometrieberechnung, Durchsatzberechnung und Wirt-

schaftlichkeitsbewertung durchzuführen. Technische Einflussgrößen auf die Geometrie wurden identifiziert und den drei Gruppen Lagerkonfiguration, Lagerstrategien und Lagerdimensionierung zugeordnet. In Anlehnung an [Gud10] wurden eine Klassifizierung für die verschiedenen Regaltechnikvarianten vorgestellt und in ein Berechnungsmodell überführt. Dieses Modell beschreibt basierend auf Lagerkonfiguration und Lagerdimensionierung die Geometrie eines Lagerbereichs und dient dazu, den folgenden Schritten der Durchsatzberechnung und Wirtschaftlichkeitsbewertung die benötigten Daten zur Verfügung zu stellen. Die regaltechnikabhängige Berechnung erfolgt, indem Lagerplätze schrittweise zu Fachmodulen und weiter zu Gangmodulen aufgebaut werden, aus denen letztlich das gesamte Lagermodul entsteht. Der so erzeugte Lagerbereich wird anschließend auf seine Gültigkeit geprüft, da sowohl aus dem Einsatzfall als auch aus Regal- und Bedientechnik verschiedene Restriktionen bestehen. Um auch besondere Layoutvarianten mit der Geometrieberechnung abdecken zu können, wurden zwei Erweiterungsmöglichkeiten gezeigt. Der modulare Aufbau des Modells ermöglicht die Einführung von Zwangsbedingungen, um beispielsweise unterschiedlich hohe Lagerplätze oder eine Kombination aus Kommissionierzone und Palettenregal aufzubauen. Zur Berücksichtigung von Lagerstrategien wurde ein Modell aufgezeigt, welches basierend auf Lagerkonfiguration und Lagerstrategien die Mindestgröße des Lagerbereichs berechnet und in die Festlegung der Lagerdimensionierung einfließen lässt.

Auf Grund der geschlossenen Struktur der Geometrieberechnung kann sie unabhängig von der vollständigen Planungssystematik als Teilmodell validiert werden, indem bei gleicher Lagerdimensionierung und Konfiguration ein Vergleich zwischen den Lagerabmessungen im Modell und realen Planungsdaten angestellt wird. Am Beispiel der Regaltechnikvariante "Palettenregal" wurde gezeigt, dass die Abweichungen im niedrigen einstelligen Prozentbereich liegen und damit eine gute Übereinstimmung zwischen Modell und Realität besteht.

Für die Erstellung einer Planungssystematik wurde eine mögliche Vorgehensweise vorgestellt, die auf der Analyse des Lösungsraums und der Teilmodelle für Geometrieberechnung, Durchsatzberechnung und Wirtschaftlichkeitsbewertung aufbaut. Die gefundene zweistufige Struktur des Lösungsraums beginnt mit der Bildung von Artikelgruppen aus dem vorgegebenen Sortiment. Aus jeder vorgenommenen Einteilung werden verschiedene Lösungsalternativen generiert, indem für jede Artikelgruppe alternative Lagerbereiche erzeugt und untersucht werden. Auf Grund der zu erwartenden großen Anzahl an Lösungsalternativen kommt der Planungssystematik und der geschickten Erzeugung vielversprechender Lösungsalternativen große Bedeutung zu. Nach der erfolgten Modellierung von Durchsatzberechnung und Wirtschaftlichkeitsbewertung sind daher insbesondere auf diesem Gebiet weitere Untersuchungen nötig.

7 DANKSAGUNG

Diese Veröffentlichung entstand im Rahmen des IGF-Vorhabens 18274N/1 „OptiMAL - Optimale Planung manuell bedienter Lagersysteme“. Das Vorhaben der Bundesvereinigung Logistik wird über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

LITERATUR

- [Ada96] Adam, D.: *Planung und Entscheidung – Modelle - Ziele - Methoden*. Betriebswirtschaftlicher Verlag Dr. Th. Galber, Wiesbaden, 1996.
- [All99] Allgayer, F.: *Computerunterstützte Planung von Materialflusssystemen auf basis statischer Materialflüsse*. Dissertation. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, Garching, 1999.
- [AF09] Arnold, D.; Furmans, K.: *Materialfluss in Logistiksystemen*. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 2009.
- [BRR80] Bassan, Y.; Roll, Y.; Rosenblatt, M.J.: *Internal Layout Design of a Warehouse*. In: AIIE Transactions, Jg. 12 (1980), Nr. 4, S. 317-322.
- [GAU11] Günthner, W.A.; Atz, T.; Ulbrich, A.: *Integrierte Lagersystemplanung*. Forschungsbericht. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, Garching, 2011.
- [Gud10] Gudehus, T.: *Logistik – Grundlagen Strategien Anwendungen*. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 2010.
- [HS10] ten Hompel, M.; Schmidt, T.: *Warehouse Management – Organisation und Steuerung von Lager- und Kommissioniersystemen*. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 2010.
- [KA04] Klein, R.; Scholl, A.: *Planung und Entscheidung – Konzepte, Modelle und Methoden einer modernen betriebswirtschaftlichen Entscheidungsanalyse*. Verlag Franz Vahlen, München, 2004.
- [RR72] Roberts, S. D.; Reed, R. Jr.: *Optimal Warehouse Bay Configurations*. In: AIIE Transactions, Jg. 4 (1972), Nr. 3, S. 178-185.
- [RR84] Rosenblatt, M.J.; Roll, Y.: *Warehouse design with storage policy consideration*. In: International Journal of Production Research, Jg. 22 (1984), Nr. 5, S. 809-821.
- [RSW] Rabe, M.; Spieckermann, S.; Wenzel, S.: *Verifikation und Validierung für die*

Simulation in Produktion und Logistik – Vorgehensmodelle und Techniken. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 2008.

- [RV06] Roodbergen, K.J.; Vis, I.F.A.: *A model for warehouse layout.* In: IIE Transactions, Jg. 38 (2006), Nr. 10, S. 799-811.
- [Sad07] Sadowsky, V.: *Beitrag zur analytischen Leistungsberechnung von Kommissioniersystemen.* Dissertation. Lehrstuhl für Förder- und Lagerwesen, Universität Dortmund, Dortmund, 2007.
- [SG15] Staab, T.; Günthner, W.A.: *Systematisierung - aber wie? Verbesserte Planung manueller Lagersysteme.* In: Hebezeuge Fördermittel, Jg. 55 (2015), Nr. 6, S. 308-310.

Dipl.- Ing. Tobias Staab, Research Assistant at the Chair of Materials Handling, Material Flow, Logistics, Technische Universität München.

Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wi.-Ing. Willibald A. Günthner, Chairholder of the Chair of Materials Handling, Material Flow, Logistics, Technische Universität München.

Address: Lehrstuhl für Fördertechnik, Materialfluss, Logistik, Technische Universität München, Boltzmannstraße 15, 85748 Garching, Germany,
Phone: +49 89 / 289 15921, Fax: +49 89 / 289 15922,
E-Mail: kontakt@fml.mw.tum.de