1. Einleitung

„Unter einem automatischen Hochregallager ist ein Hochregallager zu verstehen, bei dem die Steuerung der Regalförderzeuge automatisch erfolgt. [...] Die Automatik in einem automatischen Hochregallager beschränkt sich also auf die Steuerung der Regalförderzeuge. Dies bedeutet, [...] dass die Kommissionierung außerhalb des eigentlichen Hochregallagers stattfindet. Die Entnahme der Teilmenge erfolgt nicht am jeweiligen Lagerort, sondern zentral [...]. Anschließend wird die Restpalette wieder eingelagert. Von einer vollständig automatisierten Lagerhaltung kann jedoch nicht mehr gesprochen werden.“ ([Sch69], S. 4)

Diese vor mehr als vierzig Jahren von Wilhelm Schaab in seinem Buch zur Bemessung und Wirtschaftlichkeit von automatisierten Hochregalanlagen getroffene Feststellung sollte noch über Jahrzehnte hinweg uneingeschränkt gelten, auch wenn die zunehmende Verbreitung von Industrierobotern seit den 1980er Jahren zunächst den Eindruck erweckte, als sei es nur eine Frage weniger Jahre, bis durch den Einsatz von Robotern eine automatische Lagerhaltung weit verbreiteter Stand der Technik sein würde. Doch die Vielfältigkeit der anfallenden Aufgaben in der Lagerhaltung wie etwa Greifen, Ordnen, Bereitstellen, Fördern usw., zusammen mit der oft großen Vielfalt der Eigenschaften der handzuhabenden Güter wie Größe, Gewicht, Form und Empfindlichkeit, machen die vollständige Automatisierung der Lagerhaltung zu einer technisch äußerst anspruchsvollen Aufgabe. Dies gilt insbesondere für die Kommissionierung. Doch gerade hier ist eine Automatisierung besonders interessant, macht die Kommissionierung doch einen Großteil aller Aktivitäten in Lagern aus und bietet damit ein hohes Einsparpotenzial.

Erste Systeme zur automatischen Entnahme einer Teilmenge von Paletten traten bereits in den 1970er Jahren in Erscheinung, waren jedoch auf ein eingeschränktes Güterspektrum beschränkt und auf eine definierte Bereitstellung der zu kommissionierenden Güter angewiesen. [Kes82] Automatische Systeme zur Vereinzelnung von Gütern unterliegen auch heute häufig noch Restriktionen, die sie nur für ein eingeschränktes, möglichst homogenes Güterspektrum einsetzbar machen. Durch Kombination von

automatischen Hochregallagern mit Fördertechnik und automatischer Entnahme der Güter von der Palette lassen sich zwar automatische Lager realisieren, immer jedoch mit der Einschränkung, dass die Vereinzelnung nicht am Lagerort selbst stattfindet. Systeme für die automatische Kommissionierung eines weiten, heterogenen Güterspektrums beginnen erst sich durchzusetzen.

Voranschreitende Technik ermöglichte eine Erweiterung des handhabbaren Güterspektrums, und Mitte des ersten Jahrzehnts dieses Jahrtausends wurden die ersten Systeme vorgestellt und in der freien Wirtschaft eingesetzt, die eine Realisierung von automatischen Distributionszentren ermöglichten, in denen über 10.000 verschiedene Artikel aus der Einzelhandelsbranche gehandhabt werden können.¹ Mittlerweile sind weitere automatische Lösungen für Distributionszentren von anderen Anbietern hinzugekommen, alle haben jedoch weiterhin dieselbe Einschränkung: Die Entnahme der Teilmenge erfolgt nicht von der Palette am Lagerort.

Das Konzept eines Regalpickers, dessen Prototyp im Jahr 2008 am Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik (IML) in Dortmund seinen Betrieb aufnahm, ermöglicht nun die Realisierung einer vollständig automatisierten Lagerhaltung, wie Schaab sie beschreibt: Artikel können direkt im Palettenregal von eingelagerten Paletten entnommen werden. Darüber hinaus werden auch die Paletten selbst mit dem Regalpicker ein-, aus- oder umgelagert. Der Transport der kommissionierten Artikel aus dem Regal heraus erfolgt dabei über integrierte Vertikal- und Horizontalförderer. (vgl. [MStH08]; [SM08b]; [SM08a])

Das System eröffnet damit neue Möglichkeiten bei der Gestaltung automatischer Kommissioniersysteme. Damit stellt sich die Frage nach sinnvollen Gestaltungsmöglichkeiten der Systeme, d. h. nach sinnvollen Einsatzszenarien für den Regalpicker. Zudem ist zu bewerten, unter welchen Randbedingungen diese Szenarien vorteilhaft sind. Die Randbedingungen werden dabei vor allem durch das handzuhabende Artikelspektrum und die vorherrschende Auftragsstruktur bestimmt. Zusätzlich hängt die Leistung von Materialflusssystemen i. d. R. von den gewählten Betriebsstrategien ab, so dass es auch diese zu berücksichtigen gilt.

1.1 Ziel der Arbeit

Um die Einsatzmöglichkeiten des Regalpickers bei der Gestaltung (automatischer) Kommissioniersysteme zu untersuchen und um die Leistungsfähigkeit

¹ Die erste Vorstellung eines derartigen Systems fand im Jahr 2004 statt, der erste Einsatz in einem automatischen Distributionszentrum eines Lebensmittel-Einzelhändlers in Deutschland im Jahr 2008. (vgl. [Log08]; [Pri08]; [IIHW⁺08])

des Regalpickers zu bewerten, lassen sich drei Fragestellungen formulieren, deren Beantwortung Ziel dieser Arbeit ist:

1. *Wo liegen sinnvolle Einsatzszenarien für den Regalpicker?* Der Regalpicker ermöglicht die automatische Kommissionierung von auf Paletten gelagerter Ware in Form von Kolli² im Regal, also direkt am Lagerort der Paletten. Gleichzeitig ist er in der Lage, komplette Paletten auszulagern und damit z. B. weitere Kommissionierläger mit Nachschub zu versorgen. Aus dieser hybriden Natur des Regalpickers ergeben sich völlig neue Möglichkeiten der Gestaltung von Kommissioniersystemen, dabei kann der Regalpicker herrschende Lücken insbesondere bei der automatischen Kommissionierung langsam laufender Artikel schließen. In dieser Arbeit gilt es, entsprechende Einsatzszenarien für den Regalpicker aufzuzeigen und zu definieren.
2. *Wie lässt sich die Leistung des Regalpickers quantitativ bewerten?* Zur Bewertung der Leistung des Regalpickers ist die Berechnung seiner Spielzeit erforderlich. Da, wie im Laufe der Arbeit gezeigt werden wird, jedoch die Leistung des Regalpickers durch seine Doppelfunktion der Palettenhandhabung und Kommissionierung im Regal in besonderer Weise mit der Gesamtsystemleistung in Wechselwirkung steht, muss zur Leistungsbewertung stets die Gesamtsystemleistung betrachtet werden. In dieser Arbeit soll zunächst ein geeignetes Spielzeitmodell für den Regalpicker entwickelt werden, möglichst auf analytischem Wege (in Abgrenzung zu simulativen Methoden oder Näherungsverfahren). Anschließend ist ein mathematisches Modell zur Berechnung der Gesamtsystemleistung zu entwickeln.
3. *Wie sehen geeignete Betriebsstrategien für den Regalpicker aus?* Üblicherweise finden in Materialflusssystemen besondere Strategien zur Erhöhung der Leistung Anwendung, beispielsweise zur optimierten Zuordnung der Artikel zu Lagerplätzen. Um die Leistung des Regalpickers realistisch einzuschätzen, ist es deshalb auch notwendig, mögliche Optimierungsstrategien für seinen Betrieb zu ermitteln. Lassen sich geeignete Strategien finden, so muss ihr Einfluss auf die Leistung des Systems bestimmt werden. Ein Ziel dieser Arbeit ist deshalb, geeignete Betriebsstrategien für den Regalpicker zu ermitteln und das entwickelte mathematisch-analytische Modell auf die Anwendung dieser Strategie(n) zu erweitern.

² „[...] Plural von Kollo. Der Begriff [...] bedeutet Frachtstück, Frachteinheit, Packstück. Weiterhin bezeichnet er eine Zusammenfassung von Artikeleinheiten.“ ([tHH06], S. 111)

1.2 Aufbau der Arbeit

Um die unter 1.1 beschriebenen Ziele zu erreichen, geht die Arbeit in sieben Schritten vor und ist in entsprechende Kapitel eingeteilt:

Kapitel 2 führt in die Grundlagen der (automatischen) Kommissioniersysteme ein und ist dazu in drei Unterkapitel aufgeteilt. Unter 2.1 findet eine Einführung in die theoretischen Grundlagen der Kommissionierung und den Aufbau entsprechender Systeme statt, woraufhin unter 2.2 der Stand der Technik automatischer Kommissioniersysteme untersucht wird. Schließlich werden in Kapitel 2.3 die mathematischen Grundlagen zur Beschreibung und Leistungsberechnung von Kommissioniersystemen erläutert.

Kapitel 3 behandelt die Grundlagen von Regalbediengeräten (RBG). Da der Regalpicker auf einem Regalbediengerät basiert und seine Funktion ähnlich ist, liefern Ergebnisse aus der Forschung zu Regalbediengeräten die wesentlichen Grundlagen zur Entwicklung eines Modells zur Spielzeitberechnung für den Regalpicker. Es werden zunächst Aufbau und Funktion von RBG beschrieben (Kap. 3.1) und anschließend unter 3.2 die Grundlagen der Spielzeitberechnung von RBG vorgestellt. Kapitel 3.3 stellt die wichtigsten für RBG entwickelten Betriebsstrategien vor, welche später (in Kapitel 4.4) auf ihre Anwendbarkeit für den Regalpicker zur Reduzierung dessen Spielzeiten hin untersucht werden. Abschließend erfolgt in Kapitel 3.4 eine kurze Darstellung der wichtigsten analytischen Spielzeitmodelle.

In Kapitel 4 wird der Regalpicker detailliert behandelt. Zunächst werden unter 4.1 Aufbau und Funktion des Konzepts erläutert. Anschließend werden unter 4.2 mögliche und sinnvolle Varianten zur konkreten Ausführung einer solchen Maschine erarbeitet. Darauf aufbauend werden unter 4.3 Szenarien für den Einsatz des Regalpickers in übergeordneten Gesamtsystemen zur Kommissionierung entworfen. Abschließend werden in Kapitel 4.4 die zuvor vorgestellten Betriebsstrategien für RBG auf ihre Anwendbarkeit auf den Regalpicker hin untersucht. Dabei wird gezeigt, dass eine geeignete Lagerplatzvergabe-strategie für den Regalpicker nicht existiert und die Lagerplatzvergabe-strategie *verschobene A-Zone* für den Regalpicker entwickelt.

Nachdem die Arbeitsweise des Regalpickers beschrieben ist, wird in Kapitel 5 ein mathematisch-analytisches Spielzeitmodell für diesen entwickelt. Das Kapitel gliedert sich dabei in vier Unterkapitel: Unter 5.1 bis 5.3 wird das mathematische Modell zur Berechnung der Spielzeit des Regalpickers entwickelt. In Kapitel 5.4 werden anschließend unter Anwendung des Modells die zu erreichenden Spielzeiten des Regalpickers mit den verschiedenen unter Kapitel 4.2 vorgestellten Ablaufvarianten verglichen. Aufbauend auf dem

vorangegangenen Kapitel wird das mathematische Modell in Kapitel 6 auf die Anwendung der unter 4.4 eingeführten Betriebsstrategie *verschobene A-Zone* erweitert.

In Kapitel 7 wird schließlich eine Methode zur Berechnung der Leistung des Gesamtsystems, in dem sich der Regalpicker befindet, entwickelt. Da der Regalpicker in diesen Systemen mit Kommissionierung und Palettenein- und -auslagerungen zwei verschiedene Aufgaben übernimmt, wird dabei von hybriden Systemen gesprochen. Bei der Modellierung des Gesamtsystems wird auf die in 4.3 vorgestellten Szenarien zurückgegriffen. In drei Beispielrechnungen wird die entwickelte Vorgehensweise verdeutlicht.

Kapitel 8 gibt abschließend eine Zusammenfassung der erarbeiteten Ergebnisse und identifiziert offene Punkte und weiteren Forschungsbedarf.