

Entwicklung einer Methodik zur systematischen Beschreibung von automatischen Lagersystemen

Simon Schaffer,
Philipp Sereda,
Markus Katz,
Michael Eder,
Georg Kartnig

Institut für Konstruktionswissenschaften und Produktentwicklung
Forschungsbereich Konstruktionslehre, Fördertechnik und Ecodesign
Forschungsgruppe Konstruktionslehre und Fördertechnik
Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften
Technische Universität Wien

Die Planung von automatischen Lagersystemen basiert bislang häufig auf empirischen Herstellerdaten oder aufwendigen Simulationen. Analytische Ansätze, insbesondere standardisierte Methoden, existieren nur vereinzelt und sind meist auf spezifische Systeme beschränkt. Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung einer systematischen Beschreibungsmethodik zur Modellierung automatischer Lagersysteme. Die Grundlage bildet die funktionale Unterteilung in die Bereiche Lagerung, Transport und Übergabe, die jeweils durch klar definierte Module abgebildet werden. Die Entkopplung dieser Funktionen ermöglicht eine strukturierte und zugleich technologie- sowie layoutunabhängige Systembeschreibung. Ergänzt wird diese durch Koppelungsbedingungen in Form von Regelwerken und Layoutvorgaben, die eine flexible Modellierung für unterschiedlichste Systeme erlauben. Die Anwendbarkeit der Methodik wird am Beispiel des *Gebhardt Instapick*-Systems demonstriert. Dabei wird gezeigt, wie qualitative und quantitative Eigenschaften sowie Systemzustände in eine konsistente Beschreibung überführt werden können. Auf dieser Grundlage lassen sich erste Erkenntnisse für die automatisierte Berechnung von Spielzeiten ableiten und ein Beitrag zur Entwicklung analytischer Planungsinstrumente leisten.

[Keywords: Automatische Lagersysteme, Systematik, Spielzeitmodelle, RCS/RS]

The planning of automated storage systems has so far been largely based on empirical manufacturer data or complex simulations. Analytical approaches, particularly standardized methods, exist only in isola-

ted cases and are usually limited to specific systems. This work develops a systematic description methodology for modeling automated storage systems. The foundation is the functional subdivision into the areas of storage, transport, and transfer, each represented by clearly defined modules. The decoupling of these functions enables not only a structured but also technology- and layout-independent system description. This is supplemented by coupling conditions in the form of rule sets and layout specifications, which allow flexible modeling for a wide variety of systems. The applicability of the methodology is demonstrated using the *Gebhardt Instapick* system. It is shown how qualitative and quantitative properties as well as system states can be transformed into a consistent description. Based on this, initial insights can be derived for the automated calculation of cycle times, contributing to the development of analytical planning tools.

1 EINLEITUNG

Die Entwicklungen des 21. Jahrhunderts haben das Konsumverhalten und die Erwartungen der Verbraucher nachhaltig geprägt. Produkte, die früher ausschließlich im stationären Handel erhältlich waren, werden heute zunehmend online bestellt. Dieser Trend erreichte während der Corona-Pandemie seinen Höhepunkt, wurde jedoch durch den Ukrainekrieg und die angespannte wirtschaftliche Lage deutlich gebremst und war stellenweise sogar rückläufig. Trotz dieser Unsicherheiten zeigte sich im Jahr 2024 sowie in den Prognosen für 2025 erneut ein Wachstum im E-Commerce. Allein in Deutschland wurden 2024 über 88 Milliarden Euro im Onlinehandel umgesetzt, was etwa einem Siebtel des gesamten Einzelhandelsumsatzes ent-

spricht [1]. Prognosen deuten zudem auf eine weiterhin steigende Entwicklung hin [2].

Dieses dynamische Wachstum bringt erhebliche logistische Herausforderungen mit sich, insbesondere in der Letzten Meile sowie in vorgelagerten Prozessen wie Lagerung und Kommissionierung. Um Kosten und Lieferverzögerungen zu vermeiden, ist eine gezielte Optimierung dieser Abläufe unerlässlich. Ein hoher Effizienzgrad wird in der Regel durch „Ware-zu-Person“-Strategien mit dem Einsatz automatischer Lagersysteme erreicht. Die zunehmende Anzahl solcher Systeme zeigt sich sowohl in den Umsatzsteigerungen der Hersteller als auch in der steigenden Nachfrage infolge des Fachkräftemangels [3] [4].

Erste automatisierte Lagersysteme kamen bereits in den 1960er-Jahren zum Einsatz [5]. Im Vergleich zu diesen ersten Anlagen haben sich bis heute Layouts, Leistungsfähigkeit und Betriebsstrategien jedoch erheblich weiterentwickelt, um den steigenden Anforderungen moderner Lieferketten gerecht zu werden.

Trotz dieser Fortschritte basiert die Planung automatischer Lagersysteme heute häufig auf Erfahrungswerten der Hersteller oder auf aufwendigen Simulationsmodellen. Letztere liefern zwar verlässliche Ergebnisse, sind jedoch zeit- und kostenintensiv und erfordern hohe Rechenkapazitäten. Ergänzend werden analytische Methoden wie Spielzeitmodelle oder Wartesysteme eingesetzt, die jedoch meist nachträglich und spezifisch für einzelne Systeme entwickelt werden. Einheitliche Standards oder systematische Vorgehensweisen haben sich aufgrund des kontinuierlichen Wandels dieser Systeme bislang kaum etabliert.

Vor diesem Hintergrund wird in dieser Arbeit eine Methodik vorgestellt, mit der sich automatisierte Lagersysteme strukturiert beschreiben und Leistungsdaten ableiten lassen. Ziel ist die Entwicklung einer flexiblen, standardisierten Vorgehensweise, die sowohl bestehende als auch zukünftige Systeme abbildet. Daraus ergeben sich folgende Forschungsfragen:

- Wie kann ein automatisches Lagersystem strukturiert werden, um die bestehenden und zukünftigen Systeme abbilden zu können?
- Wie müssen diese Bereiche miteinander verknüpft werden, um die Funktionsweise eines automatisierten Lagersystems vollständig zu beschreiben?

Die vorliegende Arbeit ist in fünf Kapitel gegliedert. Nach einer Einführung in die Thematik folgt in Kapitel 2 ein Überblick über die vorhandene Literatur und relevante Ansätze. Kapitel 3 beschreibt die entwickelte Systematik mit besonderem Fokus auf die Module und deren Verknüpfungen. In Kapitel 4 wird die Methodik anhand einer Übertragung des *Gebhardt Instapick*-Systems [6] angewendet. Kapitel 5 schließt die Arbeit mit einer Conclusio und einem Ausblick ab.

2 LITERATUR

Die Zahl wissenschaftlicher Veröffentlichungen zu automatisierten Lagersystemen steigt kontinuierlich. Eine einfache Suche in Google Scholar ergibt bereits eine sechsstellige Trefferzahl, und allein im laufenden Jahr 2025 wurden schon über 16.000 Arbeiten im Kontext zu diesen Systemen veröffentlicht. Trotz dieser beeindruckenden Menge befasst sich jedoch nur ein kleiner Teil der Forschung (stiefmütterlich) mit der strukturierten funktionalen Organisation von Lagersystemen, die als Grundlage für einen analytischen Ansatz zur automatisierten Durchsatzbewertung dienen könnten.

Allgemeine Publikationen zum Thema Lagersysteme wie die von Jünemann und Daum [7], ten Hompel et al. [3] oder Schmidt [8] verfolgen den Ansatz von Klassifizierungen, die auf strukturellen Merkmalen von Lagersystemen basieren. Jünemann und ten Hompel unterscheiden zunächst zwischen Systemen mit und ohne Regalen und dann zwischen statischer Lagerung, bei der Lagereinheiten ortsfest sind, und dynamischer Lagerung, bei der Lagereinheiten zwischen Lagerung und Entnahme bewegt werden. Schmidt ergänzt diese Kategorisierung um Kriterien wie Lagerhöhe, Art der gelagerten Güter oder den Einsatz von Ladungsträgern wie Paletten, Behältern oder Trays [7] [3] [8].

Azadeh et al. [9] gehen in diesem Kontext deutlich spezifischer vor. Sie differenzieren zwischen verschiedenen Arten von Fördersystemen wie Shuttles und AGVs und unterteilen diese weiter bis hin zu einzelnen Systemtypen [9].

Diese Kategorisierungen sind hilfreich zur Beschreibung und Einordnung von Lagersystemen, liefern jedoch keine Grundlage für eine systematische analytische Methode zur Durchsatzberechnung. Insbesondere eine funktionale Betrachtung der Prozesse Lagerung, Transport und Übergabe bleibt unberücksichtigt.

Einen vielversprechenden Ansatz für die Betrachtung eines Lagersystems verfolgen Wagner et al. [10], die zwischen einem qualitativen Teil (Level 1) und einem quantitativen Teil (Level 2) unterscheiden. Im qualitativen Teil werden die Grundstruktur des betrachteten Lagers sowie relevante Parameter systematisch erfasst. Der quantitative Teil zielt darauf ab, Lagerprozesse wie Bewegungsabläufe sowie Lager- und Entnahmestrategien detailliert zu analysieren. In ihrer Arbeit stellen die Autoren bislang nur den aktuellen Stand des qualitativen Teils anhand zweier Beispiele vor. Dieser Teil umfasst die Identifikation relevanter Systemparameter und deren Aufbereitung in Form eines morphologischen Kastens. Das Modell stellt damit einen wichtigen ersten Schritt hin zu einer analytischen Planungsmethode für die Durchsatzberechnung dar. Allerdings weist der Ansatz eine monolithische Struktur auf und basiert auf zahlreichen vordefinierten Randbedingungen,

was die Anwendbarkeit auf andere Systeme einschränkt. Darüber hinaus befindet sich die Methode noch in einem frühen Entwicklungsstadium und dient derzeit eher als Demonstration eines möglichen Vorgehens als einem nutzbaren Planungsinstrument [10].

Eine andere Perspektive bieten McGinnis [11] und darauf aufbauend Sprock et al. [12]. Ihre Herangehensweise orientiert sich an Konzepten, wie sie typischerweise aus der Programmierung bekannt sind.

McGinnis [11] beschreibt einen strukturierten Ansatz zur Planung und Gestaltung von Lager, der den gesamten Prozess in klar abgegrenzte Schritte unterteilt. Zunächst werden die Anforderungen und Materialflüsse analysiert und in funktionale Einheiten gegliedert. Anschließend werden die notwendigen Lagerfunktionen definiert, bevor in einem zweiten Schritt die technische Umsetzung festgelegt wird. Der Ansatz basiert auf formaler Modellierung, um Struktur, Abläufe und Steuerung konsistent zu beschreiben, den Planungsprozess transparent zu machen und die Grundlage für systematische Verbesserungen oder computergestützte Optimierungen zu schaffen [11].

Sprock et al. [12] entwickeln darauf aufbauend einen formalisierten hierarchischen Ansatz, der Lagerhäuser in klar definierte Teilprobleme zerlegt und über eine Referenzarchitektur sowie eine domänenspezifische Sprache integriert. Grundlage ist die Analyse von Inflows und Outflows, aus der eine logische Architektur und eine dreistufige Meta-Hierarchie aus Struktur-, Verhaltens- und Steuerungsebene entsteht. Diese Struktur ermöglicht den gezielten Einsatz von Analyse- und Optimierungsmodellen, die konsistente Modellierung von Subsystemen sowie die Wiederverwendung von Modellbausteinen. Am Beispiel eines Lagersystems demonstrieren die Autoren, wie Varianten davon systematisch bewertet und mit Simulation optimiert werden können, um eine reproduzierbare modellbasierte Grundlage für den gesamten Entwurfsprozess zu schaffen [12].

Nach Auswertung der Literatur bieten die Ansätze von McGinnis und Sprock eine fundierte Grundlage für eine logische und analytisch sinnvolle Gliederung in Funktionsbereiche. Auch bei Wagner et al. findet sich eine Aufteilung des Lagers in mehrere Teilbereiche.

3 EINFÜHRUNG IN DIE SYSTEMATIK

Um eine analytische Methode zur Berechnung des Durchsatzes zu entwickeln, ist es zunächst erforderlich, bestehende Lagersysteme mithilfe einer systematischen Beschreibungsmethodik einheitlich und verallgemeinert darzustellen. Ein zentrales Ziel dieser verallgemeinerten Betrachtung besteht darin, dass auch zukünftige Systeme

mit derselben Methodik abgebildet werden können.

Im ersten Schritt müssen daher die grundlegenden Funktionen eines Lagersystems identifiziert werden, die von jedem System zu erfüllen sind. Aus diesen Funktionen lassen sich Parameter ableiten, die sowohl für die modellhafte Abbildung als auch für die Ermittlung des Durchsatzes relevant sind. Entscheidend ist, dass diese Parameter so allgemein formuliert werden, dass sie unabhängig von einer bestimmten Lagertechnologie oder einem konkreten Layout anwendbar sind. Unter Berücksichtigung dieser Anforderungen wurde das Lagersystem funktional strukturiert und in drei Kernbereiche unterteilt, die in jedem System vorhanden sind:

- Lagerbereich
- Transportbereich
- Übergabebereich

Der Lagerbereich umfasst sämtliche zu lagernden Produkte, von einzelnen Artikeln in Verpackungen oder Kisten bis hin zu vollständigen Paletten.

Für den Transport dieser Güter ist ein Transportbereich notwendig, der die eingesetzte Fördertechnik abbilden soll.

Der Übergabebereich dient dem Wechsel zwischen verschiedenen Fördermitteln sowie der Übergabe von Artikeln an die Kommissionierung.

Die Unterteilung in diese funktionalen Bereiche ermöglicht eine Entkopplung des Gesamtsystems, sodass jeder Bereich unabhängig voneinander modelliert und beschrieben werden kann. Auf dieser Grundlage werden im Folgenden spezifische Module eingeführt und in einen systematischen Rahmen eingeordnet, um ein Lagersystem vollständig darstellen zu können.

- Lagermodul
- Handhabungsmodul
- Übergabemodul

Diese Trennung bietet den Vorteil, dass jedes Modul eigenständig definiert werden kann und bei Bedarf gezielt erweiterbar ist. Damit werden Abhängigkeiten reduziert und eine deutliche Verbesserung gegenüber monolithischen Ansätzen erreicht (vgl. Wagner et al. [10]).

3.1 BESCHREIBUNG DER MODULE

Ein Modul hat die Aufgabe, alle relevanten Parameter zusammenzufassen, die für seine vollständige Beschreibung und Anwendung notwendig sind. Jedes der drei Module verfügt über einen gemeinsamen Grundstock an Parametern und besitzt zusätzlich spezifische Parameter, die sich aus seinem Anwendungsbereich ergeben. Der grundsätzliche Aufbau eines Moduls ist auszugsweise in

Tabelle 1 dargestellt.

LAGERMODUL:

Dieses Modul bildet den Lagerbereich innerhalb des Systems ab. Es beschreibt die räumliche Struktur und Organisation der Lagereinheiten sowie deren Positionierung. Darüber hinaus enthält es Angaben zum Füllgrad, zu möglichen Relativbewegungen während des Lagerungsprozesses, zur Lagerstrategie und zur Zugriffsrichtung für Ein- und Auslagerungen. Neben diesen qualitativen Parametern sind auch quantitative Größen wie Distanzen zwischen den Lagereinheiten enthalten, die für die Ermittlung von Leistungsdaten relevant sind.

Die Größe des Lagersystems wird auf die Maße eines Lagerplatzes bezogen.

HANDHABUNGSMODUL:

Das Handhabungsmodul bildet den internen Materialfluss innerhalb des Lagers ab. Da viele Lagersysteme aus mehreren Transportabschnitten bestehen, kann es erforderlich sein, mehrere Handhabungsmodul zu definieren. Jedes Handhabungsmodul repräsentiert dabei ein spezifisches Fördermittel, wie etwa ein Regalbediengerät, ein Shuttle oder einen Shuttle-Lift. Für die Beschreibung des Handhabungsmoduls sind insbesondere die geometrischen Eigenschaften und Bedienungsrichtungen des Ein- und Auslagerungsmechanismus mittels LAM relevant. Ergänzt werden diese qualitativen Angaben, zu denen auch Umlagerungsstrategien und Spielarten (SCC, DCC, MCC) zählen, durch quantitative Parameter wie Geschwindigkeiten, Beschleunigungen sowie Aufnahme- und Abgabezeiten. Ein weiterer zentraler Bestandteil ist die Beschreibung des Arbeitsraumes des Handhabungsgerätes mit seinen geometrischen Abmessungen. Der Arbeitsraum definiert, in welchem Bereich ein Gerät eingesetzt werden kann und legt damit die räumlichen Grenzen für mögliche Transportwege und Übergabepunkte fest. Diese Information ist essenziell, da sie die Positionierung der Module im Layout beeinflusst.

ÜBERGABEMODUL:

Das Übergabemodul definiert Schnittstellen für die Übergabe von Artikeln oder Fördermitteln an externe Bereiche, etwa eine Lagervorzone oder eine Kommissionierung. Es bildet damit den logistischen Start- oder Endpunkt des Lagerungsprozesses. Darüber hinaus kann es auch Übergabepunkte zwischen verschiedenen Handhabungsgeräten darstellen, die als Arbeitspunkte fungieren, beispielsweise für Gassenwechsel. Auch Pufferplätze oder Übergabetunnel aus verschiedenen Zuführungsrichtungen lassen sich hier abbilden.

Begriff	Optionen	Beschreibung
Größe:	X, Y, Z	Beschreibt die tatsächliche Größe des Lagersystems im Verhältnis zu seinem verwendeten Koordinatensystem.
Standort:	Fixiert, Mobil	Beschreibt, ob sich das Gerät bewegen kann oder einen festen Standort hat.
Einlagerungsrichtung:	X, Y, Z	Beschreibt die Richtung, in der das Gerät einlagern kann.
Auslagerungsrichtung:	X, Y, Z	Beschreibt die Richtung, in der das Gerät auslagern kann.
Einlagerungstiefe:	0, ..., n	Beschreibt die Zugriffstiefe des Handhabungsgerätes in die Lagereinheit.
Auslagerungstiefe:	0, ..., n	Beschreibt die Zugriffstiefe des Handhabungsgerätes in die Lagereinheit.
Kapazität:	1, ..., n	Beschreibt die Kapazität des Handhabungsgerätes.
Umlagerungsstrategie:	Keine, nächster Nachbar, eine Richtung	Beschreibt, wie Umlagerungen zu handhaben sind.
Rückumlagerung:	Ja, Nein	Beschreibt, ob Umlagerungen zurückgeführt werden.
Arbeitspiel/Spielzeit:	SCC, DCC, MCC	Beschreibt den Arbeitszyklus.
Handhabung:	Lagereinheit, Handhabungsmodul	Beschreibt was das HM handhabt.

Tabelle 1: Auszug aus der Beschreibung des Handhabungsmoduls

3.2 KOPPELUNG DER MODULE

Die Separierung in Module schafft die Möglichkeit einer unabhängigen Beschreibung und Erweiterung. Um jedoch ein vollständiges Lagersystem darstellen zu können, müssen die Module durch ein Regelwerk miteinander verknüpft werden. Im Zuge der Entwicklung der Systematik haben sich vier zentrale Koppelungsbedingungen herausgebildet:

- Konfiguration
- Layout

- Prozess
- Regeln

KONFIGURATION:

Sie definiert Anzahl und Art der eingesetzten Module und hängt von den spezifischen Anforderungen an das System ab.

LAYOUT:

Das Layout beschreibt die räumliche Anordnung der definierten Module innerhalb des Lagersystems und zeigt, wie diese logisch und physisch miteinander verbunden sind. Es legt fest, wo sich die Module befinden, wie sie zueinander ausgerichtet sind und wie die Materialflüsse zwischen ihnen verlaufen. Die Positionierung ist dabei nicht völlig frei, sondern kann durch die in den Modulen festgelegten Arbeitsräume eingeschränkt sein, sodass bestimmte räumliche Konstellationen vorgegeben sind. Insbesondere die Lage von Ein- und Auslagerungspunkten sowie deren Entfernung zu relevanten Handhabungsmodulen wirken sich direkt auf die Prozesszeiten und Leistungsfähigkeit aus. Damit verbindet das Layout die strukturelle Definition der Module mit einer quantitativen Analysemöglichkeit und schafft eine visuelle Übersicht des Gesamtsystems.

PROZESS:

Im Prozess werden die Abläufe des Lagersystems definiert, also die Abfolge von Einlagerung, Umlagerung und Auslagerung.

Für die Definition des Prozessablaufs sind die Informationen aus den einzelnen Modulen entscheidend. Der Ablauf ist dabei grundsätzlich frei gestaltbar und kann abhängig von den gewählten Arbeitszyklen (SCC, DCC oder MCC) sowie von den definierten Ein- und Auslagerungspunkten variieren. So kann es vorkommen, dass Ein- und Auslagerungspunkte nicht an derselben Stelle liegen oder dass ein bestimmtes Handhabungsmodul ausschließlich für Einlagerungen, Umlagerungen oder Auslagerungen eingesetzt wird. Anhand der in den Modulen enthaltenen Informationen lässt sich der Prozess exakt abbilden und für die spätere analytische Betrachtung vorbereiten.

REGELN:

Neben Konfiguration, Layout und Prozess können zusätzliche spezifische Regeln erforderlich sein, um komplexe Systeme adäquat abzubilden. Die Option, diese zusätzliche Regeln einzuführen bietet daher die Möglichkeit, besondere Einschränkungen gezielt zu berücksichtigen.

Mit der Definition der Module und der Festlegung der

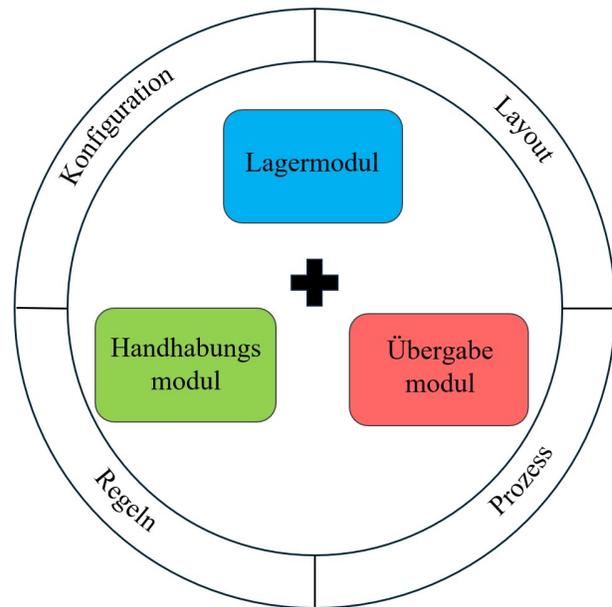


Abbildung 1: Systematik

Koppelungsbedingungen lässt sich ein Lagersystem vollständig beschreiben. Die Mindestanforderung für die Anwendung der Systematik besteht darin, mindestens ein Lagermodul, ein Handhabungsmodul und ein Übergabemodul zu definieren sowie die entsprechenden Koppelungsbedingungen anzugeben. Ohne diese Mindeststruktur ist eine vollständige und konsistente Beschreibung eines Lagersystems nicht möglich. Die Systematik in ihrer Gesamtheit ist in Abbildung 1 dargestellt.

4 ANWENDUNG DER SYSTEMATIK

In diesem Kapitel soll gezeigt werden, wie ein Lagersystem - *Gebhardt Instapick* - in die hier vorgestellte Systematik übertragen wird. Das System ist in Abbildung 2 sowie der dazugehörige Roboter mit seinem LAM in Abbildung 3 dargestellt. Seine Besonderheit liegt darin, dass es das Arbeitsprinzip eines *AutoStore*-Systems mit dem Einzelplatzzugriff eines *RBG*-Systems kombiniert. Bei mehrfachtiefer Lagerung kann - abhängig von der gewählten Lagerstrategie - entweder derselbe Artikel oder unterschiedliche Artikel in mehreren Lagereinheiten in einem mehrfachtiefen Lagerplatz hintereinander liegen, wodurch Umlagerungen erforderlich werden bzw. könnten auch Rückumlagerungen notwendig sein.

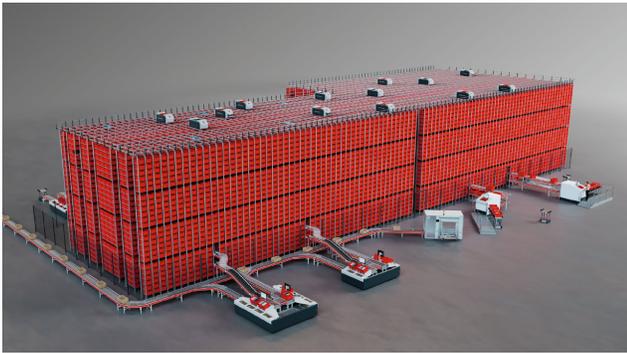


Abbildung 2: Gebhardt Instapick-System [6]



Abbildung 3: Gebhardt Instapick Roboter [6]

4.1 BESCHREIBUNG DES SYSTEMS

Für die Übertragung in die Systematik ist es zunächst notwendig, die im Kapitel 3 definierten Module im Lagersystem zu identifizieren. Abbildung 2 zeigt, dass das Lager aus quaderförmigen Regalsystemen mit mehreren Gassen aufgebaut ist. Auf der obersten Ebene bewegen sich die Roboter. Die Einlagerung von Lagereinheiten erfolgt - ausgehend von Kommissionierungsposten über Rollenförderer zu dem Übergabemodul.

Ab diesem Punkt erfolgt der gesamte Ein- und Auslagerungsprozess der Lagereinheiten ausschließlich durch den *Gebhardt Instapick*-Roboter. Der Einlagerungsprozess lässt sich in die nachfolgenden Schritte unterteilen:

1. Der Roboter übernimmt die Lagereinheit in horizontaler Richtung (Y-Achse) vom Übergabemodul.
2. Anschließend bewegt er mit dem LAM die Lagereinheit vertikal (Z-Richtung) in die oberste Ebene.
3. Dort transportiert er sie horizontal auf dem Gridsystem zur entsprechenden Regalgasse.

4. Anschließend senkt der Roboter mit dem LAM die Lagereinheit in Z-Richtung ab.
5. Auf der richtigen Höhe in der Regalgasse (Einlagerungspunkt) wird die Lagereinheit in Y-Richtung in den Lagerplatz eingeschoben.

Auslagerung gleich wie die Einlagerung nur in umgekehrter Reihenfolge (5-1). Im Doppelspielbetrieb (DCC) ist als Zwischenprozess eine Fahrt des HM's vom Einlagerungsplatz zu einem auszulagernden Artikel erforderlich. Der Auslagerungsprozess endet in beiden Fällen (SCC und DCC) mit der Übergabe der Lagereinheit an das Übergabemodul.

ANNAHMEN:

Die folgenden Annahmen dienen dazu, die Modellierung des Systems zu vereinfachen und die Übertragung in die Systematik nachvollziehbar darzustellen:

- Das Lagersystem hat eine Größe von $21 \times 15 \times 11$ Lagerplätzen und ist quaderförmig aufgebaut.
- Alle Lagergassen sind gleich strukturiert und die Lagerplätze sind zweifach tief ausgeführt.
- Es existieren ausschließlich *Instapick*-Roboter, andere Handhabungsgeräte (z.B. *KARIS®-AMR*) werden nicht berücksichtigt.
- Das Koordinatensystem ist so definiert, dass die X-Achse entlang der Gasse und die Z-Achse vertikal verläuft.
- In jedem mehrfach tiefen Lagerplatz befindet sich die gleiche Lagereinheit, sodass keine Umlagerungen oder Rückumlagerungen notwendig sind.

LAGERMODUL:

Das Lagermodul ist ein quaderförmiges Regal mit einer Abmessung von $21 \times 15 \times 11$ Lagerplätzen. Die Lagerstrategie ist zufällig, die Artikel werden nach dem LIFO-Prinzip behandelt und verbleiben während des Prozesses auf ihrem Lagerplatz. Die Ein- und Auslagerung erfolgt in Y-Richtung, und der Füllgrad wird mit 80 % angenommen.

HANDHABUNGSMODUL:

Die Handhabungsmodule sind Roboter. Jeder Roboter kann mit seinem Lastaufnahmemittel (LAM) Lagereinheiten aus Y-Richtung entnehmen und durch das Hebesystem vertikal bewegen (Z-Richtung) und nach der Aufnahme in sich selbst (siehe Abbildung 3) in X- oder Y-Richtung verfahren. Damit ist ein Bewegungsprozess in drei Achsenrichtungen (X,Y,Z) möglich. Der Arbeitsraum erstreckt sich über das gesamte Lagersystem. Der Bewegungsablauf ist in fünf

Abschnitte unterteilt, wie im Unterkapitel 4.1 beschrieben. Die Ein- und Auslagerung erfolgt in Y-Richtung, bis zu einer Tiefe von zwei Plätzen. Jeder Roboter kann jeweils nur eine Lagereinheit bewegen. Der Betrieb erfolgt im DCC, die Auftragsabwicklung nach dem „First Come, First Served“-Prinzip und der Roboter handhabt ausschließlich Lagereinheiten.

ÜBERGABEMODUL:

Das Übergabemodul dient als Schnittstelle für Ein- und Auslagerung. Es stellt den Start- und Endpunkt des Lagersystems dar und ist als einfache Durchreiche zur Kommissionierung oder Lagervorzone ausgeführt. Seine Abmessung beträgt $1 \times 2 \times 1$ seine Lage ist fixiert und die Handhabung erfolgt in Y-Richtung. Die Kapazität ist auf eine Lagereinheit beschränkt.

KONFIGURATION:

Das System besteht aus einem Lagermodul und zwei Übergabemodulen (Input und Output). Die Anzahl der Roboter ist vier und sollte nicht über eine bestimmte Anzahl hinausgehen, um Blockierungen zu vermeiden (vgl. Trost et al. [13]).

LAYOUT:

Die Module bestimmen die möglichen Lagen im System zu einem großen Teil. Aus dem Bewegungsablauf und den geometrischen Eigenschaften des Handhabungsmoduls, etwa der Ein- und Auslagerung in Y-Richtung, der maximalen Lagertiefe von zwei sowie der vertikalen Bewegung in Z-Richtung und der geometrischen Abmessungen des Lagermoduls ergibt sich die Ausbildung von drei Lagergassen. Während das Handhabungsmodul mit seinen Parametern bestimmte Einschränkungen vorgibt, erlaubt das Übergabemodul aufgrund seiner geringen räumlichen Ausprägung verschiedene Positionierungen. Seine Lage wird deshalb erst im Layout eindeutig festgelegt. Diese Flexibilität ist bewusst vorgesehen, um die Systematik universell einsetzbar zu machen und auch auf zukünftige Systeme übertragen zu können.

PROZESS:

Die Handhabung der Lagereinheiten erfolgt ausschließlich durch die Roboter. Der Prozess beginnt mit der Übergabe einer Lagereinheit vom Übergabemodul an das Handhabungsmodul, gefolgt vom Transport zum Lagermodul und der Einlagerung. Im DCC schließt sich daran ein Zwischenprozess an, bei dem der Roboter nach der Einlagerung direkt zum Lagerplatz des auszulagernden Artikels verfährt. Dieser Schritt ist charakteristisch für das Doppelspiel und

trägt wesentlich zur Effizienzsteigerung bei. Abschließend entnimmt der Roboter die Lagereinheit und transportiert sie zum Übergabemodul. Damit lässt sich der gesamte Ablauf in drei Abschnitte gliedern.

REGELN:

Auf Grundlage der definierten Module, der Konfiguration, der Prozessbeschreibung und des Layouts sind für das *Gebhardt Instapick*-System keine zusätzlichen spezifischen Regeln erforderlich.

Anhand der abgeleiteten Informationen aus Abbildung 2 und 3 konnten die relevanten Module identifiziert und beschrieben sowie der Ablauf der Ein- und Auslagerung dargestellt werden. Die Module sind in Tabelle 2, 3 und 4 aufgeführt. Die für die Koppelung der Module erforderlichen Angaben, die notwendig sind, um das System vollständig zu beschreiben, finden sich in Tabelle 5 und das dazugehörige Layout ist in Abbildung 4 dargestellt. Damit sind alle notwendigen Informationen vorhanden, um das Gesamtsystem in der Systematik abzubilden.

Lagermodul	
Lagerform:	Quader
Größe:	21x15x11
Lagerungsstrategie:	Zufällig
Ein- & Auslagerungsstrategie:	LIFO
Lagerplatz:	Einheitlich
Lagerplatzgröße:	1x1x1
Lagereinheit:	Einheitlich
Lagereinheitsgröße:	1x1x1
Lagereinheitskapazität:	1
Einlagerungsrichtung:	Y
Auslagerungsrichtung:	Y
Mobilität:	Fixiert
Füllungsgrad:	0.8
Δ Lagereinheitenabstand:	[0.5,0.5,0.5]

Tabelle 2: Beschreibung des Lagermoduls für ein *Gebhardt Instapick*-System

Handhabungsmodul	
Typ:	Roboter
Größe:	1x2x1
Standort:	Mobil
Mobilität/Bewegung:	X,Y,Z
Arbeitsraum:	21x15x11
Bewegungsabschnitte:	5
Mobilität im Bewegungsabschnitt:	[Y;Z;X,Y;Z;Y]
Einlagerungsrichtung:	Y
Auslagerungsrichtung:	Y
Einlagerungstiefe:	2
Auslagerungstiefe:	2
Kapazität:	1
Umlagerungsstrategie:	Keine
Rückumlagerung von Umlagerungen:	Nein
Arbeitspiel/Spielzeit:	Doppelspiel
Auftragsabwicklung:	FCFS
Handhabung:	Lagereinheit
Geschwindigkeit v:	[2,2,2]
Beschleunigung a:	[2,2,2]
Verriegelungszeit:	1s

Tabelle 3: Beschreibung der Handhabungsmodule für ein Gebhardt Instapick-System

Übergabemodul	
Größe:	1x2x1
Standort:	Fixiert
Mobilität/Bewegung:	Fixiert
Bewegungsabschnitte::	0
Mobilität im Movement	Fixiert
Bewegungsabschnitt:	
Handhabungsrichtung:	Y
Capacity:	1
Handhabung:	Lagereinheit

Tabelle 4: Beschreibung der Übergabemodule für ein Gebhardt Instapick-System

Konfiguration:	Menge:
Lagermodul:	1
Handhabungsmodul (Roboter):	4
Übergabemodul:	2
Prozess:	
Einlagerungsprozess:	Übergabemodul (Input) Handhabungsmodul (Roboter) Lagermodul
Zwischenprozess:	Lagermodul Handhabungsmodul (Roboter) Lagermodul
Auslagerungsprozess:	Lagermodul Handhabungsmodul (Roboter) Übergabemodul (Output)
Regeln:	
Lagermodul:	Nicht relevant
Handhabungsmodul (Roboter):	Nicht relevant
Übergabemodul:	Nicht relevant

Tabelle 5: Beschreibung der Konfiguration, des Prozesses und der Regeln für ein Gebhardt Instapick-System

5 CONCLUSIO UND AUSBLICK

Mit der vorgestellten Systematik wurde eine methodische Grundlage geschaffen, mit dem automatisierte Lagersysteme unabhängig von der Technologie oder dem Layout strukturiert beschrieben werden können. Die Unterteilung in Lagermodul, Handhabungsmodul und Übergabemodul ermöglicht eine klare funktionale Trennung und schafft die Möglichkeit, Systeme flexibel zu erweitern. Die Kopplungsbedingungen bestehend aus Konfiguration, Layout, Prozess und Regeln erlauben es, die einzelnen Module zu einem vollständigen Lagersystem zusammenzuführen. Am Beispiel des *Gebhardt Instapick*-System konnte gezeigt werden, dass mit Hilfe dieser Methodik, reale Systeme abgebildet werden können und deren funktionale Struktur nachvollziehbar dargestellt werden kann. Damit ist ein erster Schritt hin zu einer standardisierten, modularen Beschreibungsmethodik für Lagersysteme getan, die nicht nur die qualitative Systemdarstellung ermöglicht, sondern auch die Grundlage für analytische Verfahren zur Spielzeitberechnung bildet.

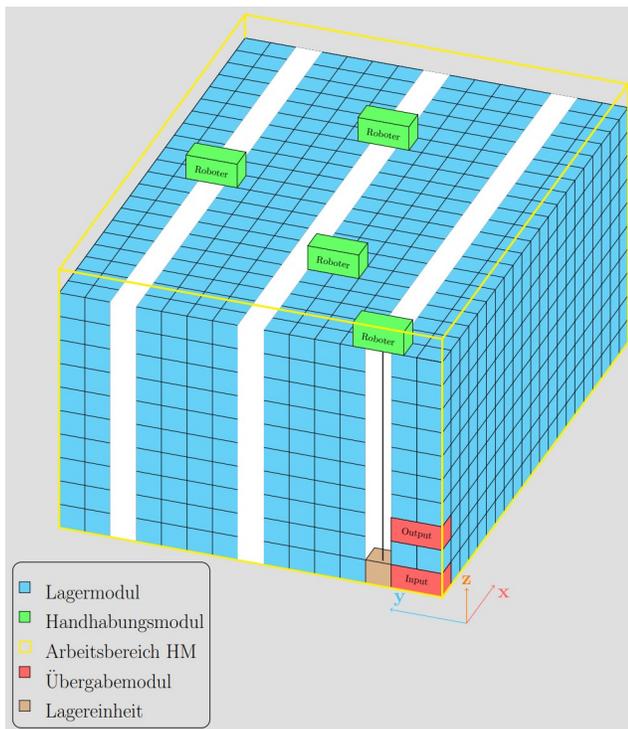


Abbildung 4: Layout zum Gebhardt Instapick-System

LITERATUR

- [1] Handelsverband Deutschland (HDE), *Umsatz durch E-Commerce (B2C) in Deutschland in den Jahren 1999 bis 2023 sowie eine Prognose für 2024 (in Milliarden Euro)* [Graph]. Statista GmbH, 4 2024. [Online]. Available: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/3979/umfrage/e-commerce-umsatz-in-deutschland-seit-1999/>
- [2] Handelsverband Deutschland (HDE), *Umsatz im Einzelhandel im engeren Sinne in Deutschland in den Jahren 2000 bis 2025¹ (in Milliarden Euro)* [Graph]. Statista GmbH, 4 2025. [Online]. Available: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/70190/umfrage/umsatz-im-deutschen-einzelhandel-zeitreihe/>
- [3] M. Ten Hompel, T. Schmidt, and J. Dregger, *Materialflusssysteme : Förder- und Lagertechnik*, 4th ed., ser. VDI-Buch. Berlin: Springer Vieweg, 2018. [Online]. Available: 10.1007/978-3-662-56181-2
- [4] ifo Institut; KfW, *Anteil der Lagerei-Betriebe in Deutschland mit Mangel an Fachkräften vom 1. Quartal 2009 bis zum 4. Quartal 2024 (in Prozent)* [Graph]. KfW, 8 2024.
- [5] W. Günthner and K. Heptner, *Logistik Digital – Die virtuelle Welt der Logistik*. Gabler, 2007, pp. 659–

679.

- [6] G. I. Group, Retrieved on August 6, 2025. [Online]. Available: <https://gebhardt-group.com/de/>
- [7] R. Jünemann and M. Daum, *Materialfluss und Logistik : systemtechnische Grundlagen mit Praxisbeispielen*, ser. Logistik in Industrie, Handel und Dienstleistungen. Berlin [u.a.]: Springer, 1989.
- [8] T. Schmidt, *Innerbetriebliche Logistik*, ser. Fachwissen Logistik. Berlin Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg Imprint: Springer Vieweg, 2019. [Online]. Available: 10.1007/978-3-662-57930-5
- [9] K. Azadeh, R. De Koster, and D. Roy, “Robotized and automated warehouse systems: Review and recent developments,” *Transportation science*, vol. 53, no. 4, pp. 917–945, 2019.
- [10] M. M. Wagner, G. Kartnig, T. Lehmann, F. Rauscher, and K. Furmans, “Entwicklung einer systematik für die durchsatzberechnung von automatisierten lagersystemen,” 2024. [Online]. Available: 20.500.12708/206265
- [11] L. McGinnis, “An object oriented and axiomatic theory of warehouse design,” in *12th IMHRC Proceedings*, Gardanne, France, 2012, p. 27.
- [12] T. Sprock, A. Murrenhoff, and L. F. McGinnis, “A hierarchical approach to warehouse design,” *International Journal of Production Research*, vol. 55, no. 21, pp. 6331–6343, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1080/00207543.2016.1241447>
- [13] P. Trost, G. Kartnig, and M. Eder, “Simulation des grenzdurchsatzes von autostore-lager-systemen simulation of the maximum throughput of autostore-storage systems,” *Logistics Journal Proceedings*, vol. 22, 11 2022.

Abkürzungen	Definition
AGV	Automated guided vehicle
DCC	Double command cycle
FCFS	First come, first served
FIFO	First in, first out
HM	Handhabungsmodul
LAM	Lastaufmittel
LIFO	Last in, first out
MCC	Multi command cycle
RBG	Regalbediengerät
RCS/RS	Robotic compact storage and retrieval system
SCC	Single command cycle

Tabelle 6: Abkürzungsverzeichnis

Dipl.-Ing. Simon Schaffer, B.Sc., Research Assistant at the Institute of Engineering Design and Product Development, Vienna University of Technology.

Dipl.-Ing. Dr.techn. Philipp Sereda, B.Sc., Research Assistant at the Institute of Engineering Design and Product Development, Vienna University of Technology.

Dipl.-Ing. Markus Katz, B.Sc., Research Assistant at the Institute of Engineering Design and Product Development, Vienna University of Technology.

Privatdoz. Dipl.-Ing. Dr.techn. Michael Eder, Habilitated Scientist, Lecturer at the Institute of Engineering Design and Product Development, Vienna University of Technology.

Dipl.-Ing. Dr.techn. Prof. Georg Kartnig, Professor at the Institute of Engineering Design and Product Development, Vienna University of Technology.

Address: Institut für Konstruktionswissenschaften und Produktentwicklung, Forschungsgruppe Konstruktionslehre und Fördertechnik, Technische Universität Wien, Getreidemarkt 9, BD04, 4. Stock, 1060 Wien, Österreich,
Telefon: +43 1 588 01- 30771,
Fax +43 1 588 01 30799
E-Mail: simon.schaffer@tuwien.ac.at

This research was funded by the Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG, German Research Foundation) – 529219715. This research was funded in whole or in part by the Austrian Science Fund (FWF) 10.55776/16757