

Entwicklung einer Systematik für die Durchsatzberechnung von automatisierten Lagersystemen

Development of a systematics for throughput calculation of automatic storage systems

Michael Maximilian Wagner¹

Georg Kartnig¹

Timo Lehmann²

Felix Rauscher²

Kai Furmans²

¹*Institut für Konstruktionswissenschaften und Produktentwicklung
Technische Universität Wien*

²*Institut für Fördertechnik und Logistik
Karlsruher Institut für Technologie*

Lagersysteme spielen eine wesentliche Rolle in der Intralogistik, wobei es eine Vielzahl unterschiedlicher Lösungen gibt. Die Erstellung von Spielzeitmodellen zur Durchsatzberechnung in der Planungsphase eines Lagersystems ist ein wichtiger Bestandteil der wissenschaftlichen Betrachtung solcher Systeme und soll mit Hilfe der in diesem Paper vorgestellten Systematik beschleunigt werden. Diese Systematik soll eine Beschreibung der Grundstruktur und -funktion jedes Lagersystems ermöglichen und dient in weiterer Folge der automatisierten Erstellung von Spielzeitmodellen.

[Schlüsselwörter: Automatisches Lagersystem, Systematik, Spielzeitmodell, Durchsatzberechnung, Lagerwesen]

Storage systems play an essential role in intralogistics, whereby there are many different solutions. The creation of cycle time models for throughput calculation in the planning phase of a storage system is an important part of the scientific consideration of such systems and is intended to be accelerated with the help of the systematics presented in this paper. This systematics should enable a description of the basic structure and function of each storage system and will subsequently be used for the automated creation of cycle time models.

[Keywords: Automated storage system, Systematic, Cycle time model, Throughput Calculation, Warehousing]

1 EINLEITUNG

Automatisierte Lagersysteme stellen eine Schlüsselkomponente in der Intralogistik dar. In den letzten Jahrzehnten wurde von der Industrie eine Vielzahl von Lagersystemen entwickelt und implementiert. In der Planungsphase wird dabei der zu erwartende Durchsatz benötigt, um die Lagersysteme richtig auslegen zu können. Dies erfolgt entweder anhand von Erfahrungswerten, Simulationen, Spielzeitmodellen oder Richtlinien, die auf Spielzeitmodellen basieren. Die wissenschaftliche Betrachtung durch Spielzeitmodelle erfolgt meist Jahre nach der ersten Implementierung dieser Systeme, wodurch Lagerplaner in den ersten Jahren auf zeit- und kostenintensive Simulationen angewiesen sind. Ein bekanntes Beispiel dafür stellt die Einführung von Hochregallagern mit Regalbediengeräten in den 1960er Jahren dar [1], während die Entwicklung eines Spielzeitmodells erst im Jahr 1972 erfolgte [2] und Richtlinien erst seit 1998 existieren [3]. Bei anderen Lagersystemen wie Autonomous Vehicle-Based Storage and Retrieval System (AVS/RS) und Robot-Based Compact Storage and Retrieval System (RCS/RS) ist die Situation ähnlich.

Die Reduzierung dieses zeitlichen Abstandes zwischen Implementierung und der Entwicklung von analytischen Spielzeitmodellen ist das Ziel hinter der in diesem Paper präsentierten Systematik. Auf diese Systematik soll die Entwicklung einer neuen Methodik zur automatisierten Durchsatzberechnung von Lagersystemen folgen. Dafür wird ein morphologischer Kasten zur Beschreibung von Lagersystemen entwickelt.

Für die Entwicklung einer solchen Systematik stellen sich die folgenden Forschungsfragen:

- Welche Eigenschaften sind notwendig, um die Funktionsweise eines automatisierten Lagersystems eindeutig zu beschreiben?
- Welche Eigenschaften eines automatisierten Lagersystems sind für die Durchsatzberechnung relevant?
- Wie können die notwendigen Eigenschaften in einem morphologischen Kasten abgebildet werden?

In diesem Paper soll die Vorgehensweise für die Entwicklung der Systematik beschrieben und der aktuelle Stand dieser Systematik dargestellt werden. Es ist folgendermaßen aufgebaut: In Kapitel 2 erfolgt eine Übersicht über die relevante Literatur, in Kapitel 3 wird der Umfang der Systematik abgegrenzt und in Kapitel 4 wird die Systematik eingeführt. Kapitel 5 beinhaltet Anwendungsbeispiele und Kapitel 6 fasst diese Arbeit abschließend zusammen.

2 LITERATUR

In dieses Kapitel wird die vorhandene Literatur zur Kategorisierung und systematischen Erfassung von automatisierten Lagersystemen eingeführt. Bei Azadeh et al. [4] erfolgt die Einteilung nach Klassen von Lagersystemen. Diese klassifizieren Lagersysteme nach deren Eigenschaften. Jede dieser Klassen wird weiter unterteilt, beispielsweise wird die Klasse „Shuttle“ in gassenbasierte und rasterbasierte Systeme aufgeteilt. Gassenbasierte Systeme

werden anhand der Lagertiefe weiter in einfach-/doppeltief oder in mehrfachtieft unterteilt.

Azadeh et al. [4] führt eine Vielzahl von verschiedenen Lagersystemen an wie z.B. Automated Storage and Retrieval System (AS/RS) mit Regalbediengerät (RBG), Autonomous Vehicle-Based Storage and Retrieval System (AVS/RS), Robot-Based Compact Storage and Retrieval System (RCS/RS), Robotic Mobile Fulfillment Systems (RMFS). Wie in Abbildung 1 zu sehen ist, werden dabei nur am Markt befindliche Lagersysteme klassifiziert. Für neue oder nicht erfasste Lagersysteme muss die Klassifizierung erweitert werden, was nicht automatisch erfolgen kann.

Eine weitere Möglichkeit der Einteilung erfolgt bei ten Hompel et al. [5] u.a. nach dem Lagermittel. Dabei wird nach der Art des Lagerplatzes unterschieden, also ob die Ladeinheit am Boden, in Regalen oder auf Fördermitteln gelagert wird. Bei der Boden- und Regallagerung wird in weiterer Folge unterschieden, ob die Ladeinheit zwischen Ein- und Auslagerung eine Ortsveränderung erfährt. Erfolgt keine Ortsveränderung liegt eine statische Lagerung vor, andernfalls eine dynamische. Die weitere Einteilung erfolgt bei der statischen Lagerung anhand der Anordnung der Lagerplätze, während bei der dynamischen Lagerung unterschieden wird, ob die Regale oder die Ladeeinheiten beweglich sind. Die dynamische Lagerung wird weiter anhand des Typs des Fördermittels, welches die Bewegung ausführt, unterteilt. Diese kann mittels Stetig- oder Unstetigförderer erfolgen. Dadurch ergibt sich eine Vielzahl an Lagermöglichkeiten.

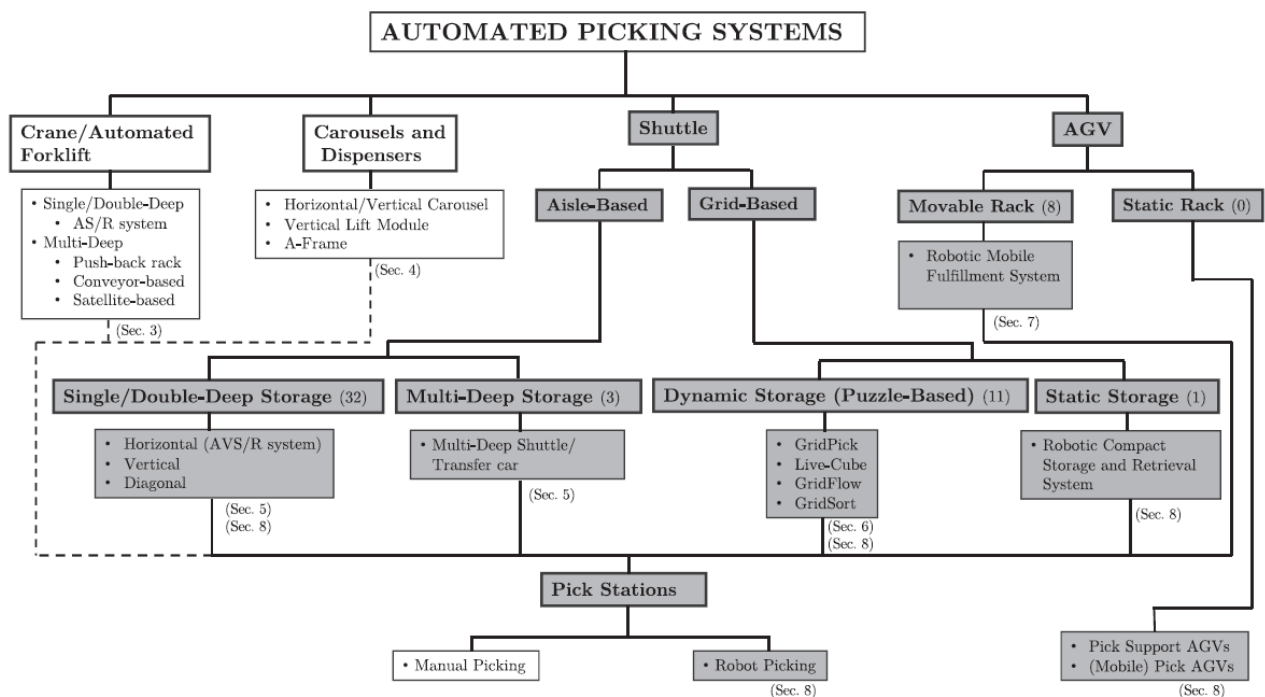


Abbildung 1. Klassifizierung nach Azadeh et al [3]

Darüber hinaus gibt es noch weitere Klassifizierungen, die dabei vergleichbar vorgehen. Beispielsweise sei hierfür Roodbergen und Vis [6] erwähnt, welche bestehende AS/R-Systeme in Systemoptionen zerlegen: „Crane“, „Handling“ und „Rack“. Ergänzend seien hier auch Jüemann und Beyer [7] erwähnt, welche Systematiken für Lagermittel und Fördermittel erarbeitet haben. All diese Systematiken haben den Nachteil, dass sie ein Lagersystem nicht so vollständig beschreiben, wie es für eine Durchsatzberechnung notwendig ist. In diesem Paper wird eine Systematik vorgestellt, die versucht Lagersysteme anhand von Grundfunktionen zu beschreiben.

3 GRUNDLAGEN DER SYSTEMATIK

Die Systematik soll folgende Anforderungen erfüllen: Sie soll sämtliche, die Randbedingungen erfüllende, bestehenden Lagersysteme abbilden und die notwendigen Parameter für die anschließende Durchsatzberechnung liefern.

3.1 RANDBEDINGUNGEN

Um die Systematik übersichtlich und anwenderfreundlich zu halten, wurden die nachstehenden Randbedingungen definiert. Dies ergibt eine Einschränkung des Lösungsraums der Systematik. Der Fokus liegt dabei auf automatisierten Lagersystemen mit rasterförmiger Ausrichtung der Lagerplätze und geradlinigen Bewegungen der Fördermittel. In der aktuellen Version werden nur die Basisausführungen von Lagersystemen betrachtet. Von der Rasterform abweichende geometrische Konfigurationen einzelner Lagersysteme werden nicht betrachtet. Die Randbedingungen, um Lagersysteme abbilden zu können, sind:

- Es werden nur homogene Lager für Stückgut betrachtet.
- Die Ladeeinheiten haben einen rechteckigen Grundriss.
- Die Ladeeinheiten sind an den Lagerplätzen entlang der x- oder y-Achse ausgerichtet.
- Die Positionen der Lagerplätze sind eindeutig definiert.
- Der Grundriss des Lagersystems ist rechteckig.
- Die Ladeeinheiten werden zum Lagerplatz mit einer minimalen Anzahl an Richtungswechseln transportiert.
- Es werden nur geradlinige Bewegungen der Ladeeinheiten betrachtet.
- Der Zugriff zu den Lagerplätzen ist aus einer Richtung möglich.
- Alle Ebenen eines Lagersystems sind identisch ausgeführt.

- Fördermittel mit Lagerfunktion werden nicht berücksichtigt.
- Die Lagervorzone wird nicht betrachtet.

3.2 DEFINITIONEN

Basierend auf den Randbedingungen und den Anforderungen der Durchsatzberechnung wurde eine Vielzahl von Definitionen für Lagereigenschaften erarbeitet. Die Definitionen beeinflussen die Gestaltung des morphologischen Kastens. Im Folgenden werden die wichtigsten Definitionen angeführt:

- **Lagerplatzgruppe**
Eine Lagerplatzgruppe ist die kleinste zusammenhängende Anordnung von Lagerplätzen. Diese ist durch Gassen und Ebenen begrenzt, aber auch durch die Zugriffstiefe des Fördermittels. Die Lagerplatzgruppe kann 1-, 2- oder 3-dimensional sein.
- **Berechnungsbereich**
Der Berechnungsbereich ist der kleinste, unabhängig funktionsfähige Bereich des betrachteten Lagersystems. Alle Berechnungen werden für diesen Bereich durchgeführt. Beispielsweise besteht bei einem AS/RS mit RBG der Berechnungsbereich aus einer einzelnen Gasse, einer Ebene und einem I/O-Punkt.
- **Bewegungsabschnitt**
Ein Bewegungsabschnitt ist jede geradlinige 1-, 2- oder 3-dimensionale Bewegung der Ladeeinheit ohne Richtungswechsel und ohne Stillstand. Die Bewegung der Ladeeinheit erfolgt durch ein Fördermittel. Die Bewegung eines RBGs in einem AS/RS wäre ein einziger Bewegungsabschnitt in xz-Richtung.
- **Gasse/Quergasse**
Bereich eines Lagersystems in dem Fördermittel operieren. In diesen befinden sich keine Lagerplätze. Gassen erstrecken sich horizontal entlang der x-Achse, und vertikal entlang der z-Achse, Quergassen entlang der y- und z-Achse. Links und rechts einer Gasse sind Lagerplatzgruppen angeordnet.
- **Ebene**
Horizontale Fläche auf der Lagerplatzgruppen platziert sind und Fördermittel operieren können. Diese sind entlang der z-Achse angeordnet.
- **Fahrebene**
Horizontale Fläche, auf welcher Fördermittel operieren.

- Fahrtschacht
Vertikaler Bereich, in welchem sich Fördermittel ausschließlich vertikal bewegen. Ein Beispiel hierfür wäre der Liftschacht bei einem AVS/RS.

4 ENTWICKLUNG DER SYSTEMATIK

Die Systematik ist in zwei Teile unterteilt: das qualitative Level und das quantitative Level. Im qualitativen Level 1 wird die Grundstruktur des Lagersystems festgelegt, während im quantitativen Level 2 eine detaillierte Ausgestaltung erfolgt. Im Level 2 werden unter anderem der Bewegungsablauf und die Ein- und Auslagerungsstrategie spezifiziert. Weitere quantitative Merkmale, wie die Anzahl der Ebenen, die Anzahl der Lagerplätze innerhalb einer Lagerplatzgruppe, die Geometrie der Ladeeinheiten sowie die Kinematik der Fördermittel, werden ebenfalls im Level 2 definiert. Diese und andere Eigenschaften sind entscheidend für die Berechnung des Durchsatzes eines Lagersystems. Ein Lagersystem ist erst dann vollständig definiert, wenn beide Level vollständig ausgearbeitet sind.

Das qualitative Level bietet ausschließlich vordefinierte Optionen an, wie beispielsweise 0 oder 1. Auf Basis des Levels 1 erfolgt die Bearbeitung des Levels 2. Das Level 1 wurde in die folgenden drei Haupteigenschaften unterteilt: Berechnungsbereich, Lagerung, Manipulation der Ladeeinheiten. Die Haupteigenschaft „Berechnungsbereich“ definiert die geometrische Grundstruktur, einschließlich Gassen, Quergassen, I/O-Punkten, Fahrtschächten und Ebenen. Jeder Berechnungsbereich besteht aus mindestens einem I/O-Punkt und einer Ebene. Die Haupteigenschaft „Lagerung“ legt fest, wie die Ladeeinheiten gelagert werden. Hier werden Zugriffsrichtung, Dimension der Lagerplatzgruppe und Bewegung innerhalb der Lagerplatzgruppe definiert. Die dritte Haupteigenschaft, „Transport der Ladeeinheiten“, beschreibt primär die grundlegenden Bewegungen, die erforderlich sind, um die Ladeeinheiten vom I/O-Punkt zum Lagerplatz zu transportieren.

Der aktuelle Status des Levels 1 ist in Tabelle 1 dargestellt. Wie ersichtlich, existieren neben Gassen, bei denen die Lagerplatzgruppen beidseitig angeordnet sind, auch sogenannte Randgassen, bei denen die Lagerplatzgruppen nur einseitig angeordnet sind. Dasselbe Prinzip wurde auf die Quergassen angewendet. Dies wird anhand von zwei Grundrissen, die in Abbildung 2 und Abbildung 3 dargestellt sind, veranschaulicht. In diesen Abbildungen ist der I/O-Punkt (grau) am Anfang einer Gasse (blau) dargestellt. Die Lagerplatzgruppen (rötlich) haben jeweils zehn Lagerplätze in x-Richtung und zwei in y-Richtung.

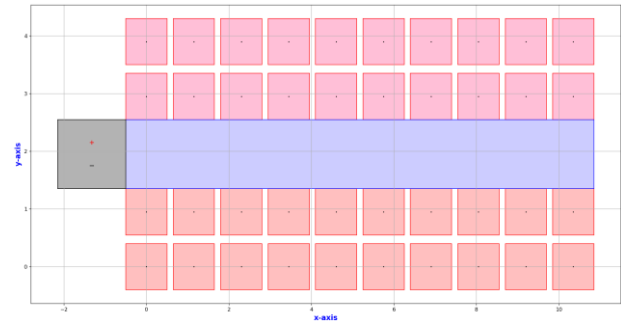


Abbildung 2. Grundriss mit einer Gasse und 2 Lagerplatzgruppen

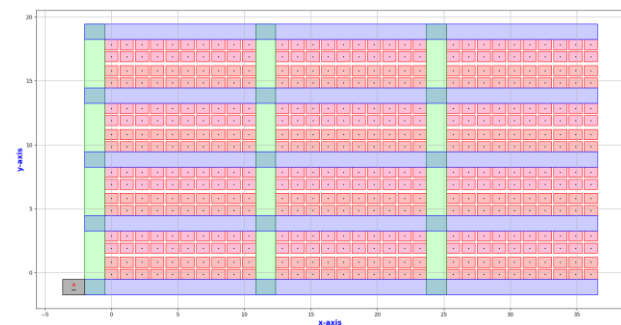


Abbildung 3. Grundriss mit 3 Gassen, 2 Randgassen, 2 Quergassen und 1 Randquergasse

5 ANWENDUNG DER SYSTEMATIK

Anhand von Beispielen soll die Anwendung des Levels 1 erläutert werden. Als erstes Beispiel wurde ein gassen- und ebenegebundenes AVS/R-System gewählt, bei welchem die Lagerplätze mehrfach tief angeordnet sind. Das zweite Beispiel ist ein RCS/R-System, mit oberhalb der Lagerplatzgruppe verfahrenen Robotern. Dargestellt sind die qualitativen Eigenschaften der Lagersysteme in Tabelle 1.

Der Berechnungsbereich des AVS/R-Systems besteht aus einer Gasse, wobei der I/O-Punkt typischerweise am Beginn einer Gasse angeordnet ist. Ebenso gibt es einen Fahrtschacht. Weiters sind mehrere Ebenen vorhanden, auf denen die Lagerplatzgruppen angeordnet sind. Der Zugriff auf die Ladeeinheiten erfolgt nach der hier verwendeten Definition aus der y-Richtung. Die Lagerplatzgruppen erstrecken sich entlang der Gasse (x-Richtung) und auf Grund der mehrfach tiefen Anordnung auch entlang der y-Richtung, weshalb diese 2-dimensional sind. Die Ein- und Auslagerung folgt nach dem LIFO-Prinzip, und es gibt keine Ortsänderung der Ladeeinheiten zwischen einer Ein- und Auslagerung. Um die Ladeeinheit zum Lagerplatz zu transportieren, sind zwei Bewegungsabschnitte von verschiedenen Fördermitteln notwendig. Diese erfolgen in x- und z-Richtung. Es erfolgt dabei eine Übergabe der Ladeeinheit von einem auf das andere Fördermittel. Die Ein- und Auslagerung in y-Richtung erfolgt durch das Lastaufnahmemittel des Fördermittels.

Tabelle 1. Aktueller Stand des Levels 1 (zu Kapitel 5: schattiert AVS/RS, unterstrichen RCS/RS)

Haupt-eigenschaft	Untereigenschaft	Lösungsbereich							
		<u>0...nein</u>				1...ja			
Berechnungs-bereich	Gassen (x-Richtung) vorhanden?	<u>0</u>				1			
	Mehrere Gassen vorhanden?	0				1			
	Sind die Gassen temporär?	0				1			
	Quergassen (y-Richtung) vorhanden?	<u>0</u>				1			
	Mehrere Quergassen?	0				1			
	Sind die Quergassen temporär?	0				1			
	Randgasse am Beginn des Berechnungsbereichs (y = 0)?	<u>0</u>				1			
	Randgasse am Ende des Berechnungsbereichs (y = 1)?	<u>0</u>				1			
	Randquergasse am Beginn des Berechnungsbereichs (x = 0)?	<u>0</u>				1			
	Randquergasse am Ende des Berechnungsbereichs (x = 1)?	<u>0</u>				1			
	Mehrere Ebenen vorhanden?	<u>0</u>				1			
	Fahrebene über der Lagerplatzgruppe?	0				<u>1</u>			
	Fahrebene unterhalb der Lagerplatzgruppe?	<u>0</u>				1			
	Mehrere I/O-Punkte vorhanden?	0				<u>1</u>			
	I/O-Punkte an Gassen/Quergassen ausgerichtet?	<u>0</u>				1			
	I/O-Punkte an Gassen ausgerichtet?	0				1			
	I/O-Punkte an Quergassen ausgerichtet?	0				1			
	I/O-Punkte an Ebenen ausgerichtet?	0				<u>1</u>			
	I/O-Punkte an Fahrebenen ausgerichtet?	<u>0</u>				1			
	Fahrschächte vorhanden?	0				<u>1</u>			
	Fahrschächte an I/O-Punkten ausgerichtet?	0				<u>1</u>			
	Fahrschächte an Gassen ausgerichtet?	<u>0</u>				1			
Fahrschächte an Quergassen ausgerichtet?	<u>0</u>				1				
Lagerung	Zugriff auf die Ladeeinheiten aus Richtung?	y				z			
	Dimension der Lagerplatzgruppe?	1D		2D		<u>3D</u>			
	Reihenfolge der Ein- und Auslagerung: 0...FIFO, 1...LIFO	0				<u>1</u>			
	Auslagern erfolgt von anderem Ort als Einlagern (z.B. andere Gasse)?	<u>0</u>				1			
	Bewegung der Ladeeinheit in der Lagerplatzgruppe zwischen Ein- und Auslagerung vorhanden?	<u>0</u>				1			
	Bewegungsrichtung der Ladeeinheiten	x	y	z	xy	xz	yz	xyz	
Transport der Ladeeinheit	Mehrere Bewegungsabschnitte vorhanden? (exkl. Einlagern)	0				<u>1</u>			
	Verschiedene Fördermittel beteiligt?	<u>0</u>				1			
	Übergabe der Ladeeinheiten auf andere Fördermittel?	<u>0</u>				1			
	Bewegungsrichtung der Ladeeinheiten (exkl. Einlagern)	x	y	z	xy	xz	yz	<u>xyz</u>	
	Ein- und Auslagerung erfolgt durch: 0...Fördermittel, 1...Lastaufnahmemittel	0				<u>1</u>			

Bei dem im zweiten Beispiel betrachteten RCS/R-System besteht der Berechnungsbereich ausschließlich aus einer Ebene, an welcher mehrere I/O-Punkte ausgerichtet sind. Oberhalb der Lagerplatzgruppe befindet sich eine Fahrbene, auf der die Fördermittel operieren. Der Zugriff auf die Ladeeinheiten in der 3-dimensionalen Lagerplatzgruppe erfolgt aus der z-Richtung. Die Ein- und Auslagerung erfolgt nach dem LIFO-Prinzip. Die Ladeeinheiten werden von einem Fördermittel, dem Roboter, in drei nacheinander erfolgenden Bewegungsabschnitten in x-, y- und z- Richtung manipuliert, bis sie durch das Lastaufnahmemittel des Roboters eingelagert werden.

6 CONCLUSIO

Bisher wurde die Entwicklung von Spielzeitmodellen in der Regel erst deutlich nach der Implementierung eines Lagersystems durchgeführt. Das übergeordnete Ziel der vorliegenden Arbeit besteht darin, diesen zeitlichen Abstand zu verkürzen oder möglicherweise sogar umzukehren. Als Voraussetzung für diese neuartige Methodik müssen Lagersysteme systematisch beschrieben werden.

Das qualitative Level dieser Beschreibung wurde in diesem Paper vorgestellt. Dabei wurde auf die Randbedingungen und Definitionen eingegangen, und basierend darauf der aktuelle Stand der Entwicklung erläutert. Obwohl dieses rein qualitative Level nur vordefinierte Optionen für die jeweilige Eigenschaft bietet, ergeben sich eine Vielzahl an möglichen Kombinationen. Dadurch lassen sich die Grundstrukturen von Lagersystemen beschreiben.

Die weiteren Schritte betreffen die Entwicklung des quantitativen Levels, wodurch die vollständige Beschreibung eines Lagersystems ermöglicht wird. Beide Level sollen weiterführend als Grundlage für eine automatische Herleitung von Spielzeitmodellen genutzt werden.

7 LITERATUR

- [1] Günthner, W. and Heptner, K.; Technische Innovationen für die Logistik. 1. München: Huss-Verl., 2007. ISBN: 9783937711546.
- [2] Gudehus, T.; Grundlagen der Spielzeitberechnung für automatisierte Hochregallager. In: dhf – Deutsche Hebe- und Fördertechnik: Sonderheft, 1972.
- [3] VDI 4480 Blatt 1:1998-02: Durchsatz von automatischen Lagern mit gassengebundenen Regalbediensystemen. VDI-Fachbereich Technische Logistik. Düsseldorf: VDI-Gesellschaft Produktion und Logistik, 1998.
- [4] Kaveh Azadeh, René De Koster, and Debjit Roy. “Robotized and Automated Warehouse Systems:

Review and Recent Developments”. In: Transportation Science 53.4 (July 2019), pp. 917–945. doi: 10.1287/trsc.2018.0873.

- [5] Michael Ten Hompel, Thorsten Schmidt und Johannes Dregger. Materialflusssysteme: Förder- und Lagertechnik. 4. Springer Vieweg, 2018. ISBN: 3662561816. DOI: 10.1007/978-3-662-56181-2.
- [6] Kees Jan Roodbergen and Iris F.A. Vis. “A survey of literature on automated storage and retrieval systems”. In: European Journal of Operational Research 194.2 (Apr. 2009), pp. 343–362. doi: 10.1016/j.ejor.2008.01.038.
- [7] Reinhardt Jünemann and Andreas Beyer. Materialfluß und Logistik. 1. Berlin: Springer, 1989. ISBN: 354051225X.

Dipl.-Ing. Michael Maximilian Wagner, BSc., Research Assistant at Institute of Engineering Design and Product Development, TU Wien.

Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr. Georg Kartnig, Professor at Institute of Engineering Design and Product Development, TU Wien.

Timo Lehmann, M. Sc., Research Associate at Institute for Material Handling and Logistics, KIT.

Prof. Dr.-Ing. Kai Furmans, Professor at Institute for Material Handling and Logistics, KIT.

Address: Institut für Konstruktionswissenschaften und Produktentwicklung, Forschungsgruppe Konstruktionslehre und Fördertechnik, Technische Universität Wien, Lehargasse 6, BD04, 4. Stock, 1060 Wien, Österreich, Telefon: +43 1 58801 30771, E-Mail: michael.maximilian.wagner@tuwien.ac.at

Adress: Institut für Fördertechnik und Logistik, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Gotthard-Franz-Str. 8, 76131 Karlsruhe, Deutschland

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.