

Simulation des Grenzdurchsatzes von *Autostore*-Lagersystemen

Simulation of the maximum throughput of *Autostore*-storage systems

Philipp Trost
Georg Kartnig
Michael Eder

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

Autostore-Lagersysteme (RCS/RS) sind vollautomatische Behälter-Kleinteilelager, die durch Roboter von oben bedient werden. Diese lagern Kunststoffbehälter gestapelt übereinander, wodurch innerhalb des Stapels die Lagerstrategie ‚Last-In-First-Out‘ Anwendung findet. Werden weiter unten befindliche Behälter benötigt, lagern die Roboter zuvor weiter oben befindliche Behälter um. Neben den Systemparametern gibt es zahlreiche weitere Faktoren, wie beispielsweise die Anzahl an Robotern und Kommissionierstationen oder die Rastergröße, die das Systemverhalten wesentlich mitbeeinflussen. Mit einer ereignisdiskreten Simulation wurden Erkenntnisse zu möglichen Auslegungsvarianten und Betriebsweisen gewonnen. Die Resultate zeigen den Einfluss der Anzahl an Robotern auf die Umschlagleistung derartiger Lagersysteme.

[Schlüsselwörter: RCS/RS, AKL, Ware-zur-Person-Kommissionierung, DES, ebenengebundene Fahrzeuge]

Robotbased compact storage and retrieval systems (RCS/RS) such as the *Autostore*-system are fully-automatic operated by robots from above. The goods are stored in plastic bins that are stacked on top of each other, applying the 'Last-In-First-Out' storage strategy within the stack. If containers located further down are required, the robots relocate them. In addition to the system parameters, there are numerous other factors, such as the number of used robots or picking stations, that influence the system behavior. With an event-discrete simulation in the Simio simulation program, insights into possible design variants and operating modes were gained. The number of robots has a large impact on the throughput of an *Autostore*-system.

[Keywords: RCS/RS, automated small-parts warehouse, goods-to-person-picking, discrete eventsimulation, tier-captive autonomous vehicle]

1 EINLEITUNG

Lieferkettenprobleme bedingt durch Krieg oder Arbeiterstreiks sowie wegen der Pandemie geschlossene Häfen führen mittlerweile zu einer deutlichen Verlangsamung des Welthandels [1,2]. Demgegenüber steht der durch pandemiebedingte Schließungen des stationären Handels unaufhaltbar rasante Trend hin zum e-Commerce [3]. Eine Bestellung per Knopfdruck zu jeder Tageszeit, die Lieferung binnen weniger Stunden sowie eine unkomplizierte Möglichkeit zur Retoursendung stellen im Jahr 2022 den Mindeststandard dar. Um dem Endkonsumenten dies zu ermöglichen, muss die Supply Chain im Hintergrund perfekt zusammenspielen. Innerhalb weniger Minuten nach der Bestellung sollte die Ware im Kommissionier- und Versandlager zusammengestellt, verpackt und versandt werden. Gerade im e-Commerce Bereich, aber auch in der Health-Care-Branche, oder im Lebensmittelhandel werden solche Prozesse immer öfter mit vollautomatischen *Autostore*-Kleinteilelagersystemen (Abbildung 1) abgewickelt. Diese werden durch Roboter vollautonom von oben bedient und lagern Kunststoffbehälter gestapelt übereinander [4,5].

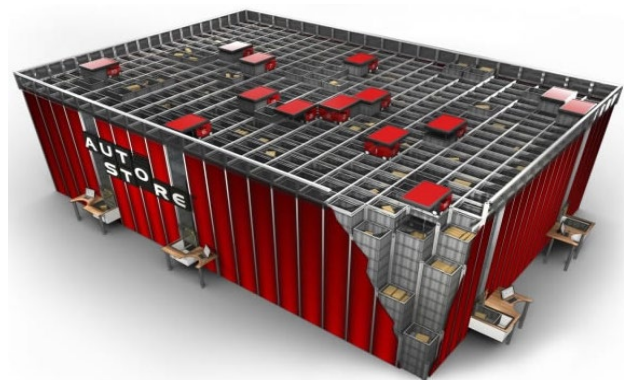


Abbildung 1. *Autostore*-Lagersystem [4]

Die Tatsache, dass derartige Systeme erst seit ca. 15 Jahren in Verwendung sind, erklärt einerseits die sehr geringe Anzahl an wissenschaftlichen Arbeiten und Fachliteratur, rechtfertigt aber andererseits, zumal bereits mehr als 850 Systeme weltweit in Betrieb sind, die ausführliche Behandlung der Thematik [4]. Weltweit gibt es nur zwei Hersteller, das namensgebende Unternehmen *Autostore* sowie den britischen Konkurrenten *Ocado*. Gemeinsam haben die beiden neben der ähnlichen Technologie die strikte Geheimhaltung sämtlicher Systemdaten. Es gibt keinerlei fundierte Aussagen, welche Systemleistung von derartigen Lagersystemen zu erwarten und wie groß der Durchsatz oder die Spielzeit ist. Wie wirkt sich die Anzahl der eingesetzten Roboter (bspw. in Abbildung 2 zu sehen) auf die Umschlagleistung aus und welchen Einfluss hat die Lagergröße darauf? Wann treten Behinderungen der Roboter untereinander auf?



Abbildung 2. Roboter am Lagerraster [5]

Ziel dieses Papers ist es daher, neben einer umfassenden Literaturrecherche in Kapitel 2, die Funktionsweise eines *Autostore*-Lagersystems zu beschreiben (Kapitel 3) und darauf aufbauend in Kapitel 4 eine Simulation zu entwickeln, um Erkenntnisse zu möglichen Auslegungsvarianten und Betriebsweisen zu gewinnen, die in Kapitel 5 dieses Papers dargelegt werden sollen.

2 LITERATURÜBERBLICK

Nachfolgend soll ein Überblick über Veröffentlichungen in Zusammenhang mit *Autostore*-Systemen in der Literatur gegeben werden. Insbesondere wurde nach Untersuchungen zur Umschlagleistung bzw. analytischen Berechnungen oder Simulationen derartiger Lagersysteme gesucht. Allgemein sei erwähnt, dass noch sehr wenige wissenschaftliche Papers oder Fachbücher existieren, die sich mit dieser Materie auseinandersetzen.

Eine der ersten Erwähnungen des *Autostore*-Systems in einem einschlägigen Fachbuch erfolgte 2018 durch den Hompel et al. [6]. Darin wird ein solches Lagersystem als innovatives Automatisches Kleinteilelager (AKL) mit kompakter Behälterstapellagerung beschrieben. Besonders positiv hervorgehoben werden neben dem hohen Raumnutzungsgrad vor allem der modulare Aufbau, die damit einhergehende einfache und flexible Erweiterbarkeit sowie die Möglichkeit der ständigen Optimierung, sodass häufig benötigte Behälter weiter oben zu finden sind [6].

Im Handbuch Industrie 4.0 [7] ergänzen die Autoren die Vorteile derartiger Systeme um die hohe Effizienz in der Ware-zur-Person-Kommissionierung und legen eine detailliertere Beschreibung der Abläufe dar. Überdies stellen ten Hompel et al. 2020 einen Vergleich zwischen den Robotertypen und deren Behälterhandhabung an [7].

Wehking [8] definiert dieses Lagersystem als eines mit feststehenden Regalen, dessen Ladeeinheiten bewegt werden und unterstreicht die flexible Anordnung sowie die hohe Lagerdichte zufolge des Entfalls der Lagergassen. Der Vergleich mit Shuttle-Systemen führt zum Schluss, dass neben der vollautomatischen Ein- und Auslagerung auch die Kommissionierung gleich abläuft [8].

Zou et al. [9] haben sich in ihrem 2016 veröffentlichten Paper das Ziel gesetzt, eine chaotische sowie eine sortierte Lagerhaltungsstrategie in einem *Autostore*-System zu untersuchen, um Erkenntnisse zum optimalen Längen-zu-Breiten-Verhältnis sowie zur Stapelhöhe zu gewinnen. Sie entwickelten eine analytische Berechnungsmöglichkeit, die sich der Warteschlangentheorie und eines halboffenen Warteschlangennetzwerkes bedient. Dies geschah unter der Annahme zahlreicher Vereinfachungen sowie der Einführung eines „Wandparameters“. Gegenseitig Behinderungen der Roboter wurden nicht weiter beachtet, da die Anzahl der Roboter im Verhältnis zum Raster als klein betrachtet wurde [9].

Zur Validierung wurde neben einer Simulation auch ein reales System verwendet. Zentrale Aussage der Untersuchung war, dass die Kosten für die - für *Autostore*-Systeme untypische - sortierte Lagerhaltung doppelt so groß werden können wie bei der chaotischen Strategie zumal mit einer Sortierung der große Vorteil des hohen Raumnutzungsgrades ad absurdum geführt würde. Demgegenüber steht die wesentlich höhere Umschlagleistung des sortierten Systems, da Umlagerungen weitgehend oder gänzlich entfallen. Zudem wurde untersucht, ob sofortiges Rückumlagern vorteilhaft sein kann [9].

Beckschäfer et al. [10] entwickelten 2017 eine diskrete Ereignissimulation (DES), mit deren Hilfe jene Lagerhaltungsstrategien für von oben durch Roboter bediente Rasterlagersysteme gefunden werden sollten, die einen positiven Einfluss auf die Effizienz des Lagers haben. Dabei wurden neben einer fixen Anzahl an Kommissionierstationen lediglich Lagerfüllgrade von rund 50 Prozent und eine konstante Stapelhöhe von 13 Behältern berücksichtigt. Die Anzahl der Roboter am Raster wurde ebenso wie die Anzahl verschiedener Produkte je Rastergröße nicht weiter variiert. Der Fokus wurde auf die strategische Frage gelegt, ob ein neues Produkt in einen leeren Behälter eingelagert werden soll oder ob ein bereits mit demselben Produkt teilweise befüllter Behälter ausgelagert werden soll, um dort den neuen Lagerartikel einzulagern [10].

Azadeh et al. [11] recherchierten 2019 Trends der Lagertechnik, beschrieben diese und untersuchten, wo

Forschungsbedarf liegen könnte. Speziell wird auf moderne RBG-bediente Lagersysteme, Automatic Storage and Retrieval Systems (AS/RS), Shuttle-bediente Systeme (AVS/RS sowie SBS/RS), und roboterbediente Lagersysteme (RMFS) eingegangen. Unter anderem werden neben Fragen zum durchsatzmaximierenden Roboterouting, zur Vermeidung von Blockaden der Roboter untereinander und zur Minimierung der erforderlichen Umlagerungsvorgänge auch Fragen zu den Anschaffungskosten von *Autostore*-Systemen aufgeworfen [11].

Die beiden relevantesten Publikationen sind von Galka et al. [12,13], der 2020 eine Studie unter 64 *Autostore*-Systemnutzern durchführte. Dabei werden neben einer Vorstellung der Firma Hatteland (*Autostore*) das System und dessen Komponenten beschrieben, wobei der Fokus auf *Autostore* gerichtet wurde. Die Befragung der Anwender lieferte allgemeine Ergebnisse zu in Betrieb befindlichen Rastergrößen, der Anzahl an eingesetzten Robotern und Kommissionierstationen, Schichtmodellen und Auftragspositionen pro Stunde. Daraus bildeten die Autoren Verhältniskennzahlen wie die Anzahl der Roboter je Rastergröße bzw. die Anzahl an Stapeln, die Anzahl der Kommissionierstationen je Rastergröße oder die Anzahl an Robotern pro Kommissionierstation. Auf Fragen zur Umschlagleistung der Systeme, Anzahl an Umlagerungsvorgängen sowie Lagerhaltungsstrategien oder Roboterouting wurde nicht eingegangen [12].

2021 wurde durch Galka et al. [13] in Zusammenarbeit mit einem Kooperationspartner eine Simulationsstudie erstellt, um den Einfluss der Anzahl von Robotern auf die Systemleistung zu eruieren. Verschiedene Zugriffswahrscheinlichkeiten auf die entsprechenden Stapelebenen stellten neben der Variation der Anzahl an Kommissionierstationen und Robotern die Parameter der Untersuchung dar. Die Stapelhöhe wurde mit 16 Behältern ebenso als fix angesehen wie die Rastergröße, die Type der Roboter und der Kommissionierstationen. Erwartungsgemäß wurden die höchsten Umschlagleistungen bei jener Zugriffswahrscheinlichkeit erzielt, bei der die wenigsten Umlagerungsvorgänge nötig waren. Es zeigt sich, dass die Grenzproduktivität der Fahrzeuge am Raster von vielen Faktoren abhängig ist. Zusätzlich wurde in einem spezifisch definierten System der Frage nachgegangen, wie sich die Mithilfe eines weiteren Roboters auf die Umschlagleistung verhält [13].

Mit der „Konzipierung von Fördermitteln mit mehreren unabhängig voneinander betreibbaren Einzelfahrzeugen“, wie Staplern, Regalbediengeräten, Shuttlefahrzeugen oder eben Robotern am Raster beschäftigen sich Arnold und Furmans [14]. Die zentrale Frage dabei ist jene nach der technisch und wirtschaftlich optimalen Nutzung dieser Fahrzeuge. Die benötigte Anzahl ist neben dem Auslastungsgrad der Fahrzeuge selbst von vielerlei Faktoren, wie der Anzahl der Aufträge, dem Anteil an Last- und Leerfahrten sowie deren Weglängen, den Übergabe- Stillstands-

Pause-, Warte- und Ladezeiten, abhängig. Eine genauere Analyse kann beispielsweise mittels einer numerischen Simulation vorgenommen werden und mittels der Warteschlangentheorie analytisch bestätigt werden. Jedenfalls zeigt sich, dass das Steigern der Anzahl an Fahrzeugen „über ein dem Anlagenkonzept verträgliches Maß hinaus“ zu Behinderungen und Blockaden der Fahrzeuge untereinander führt. Wird das Optimum, wie es in Abbildung 3 anschaulich dargestellt ist, überschritten, sinkt der Durchsatz wieder [14].

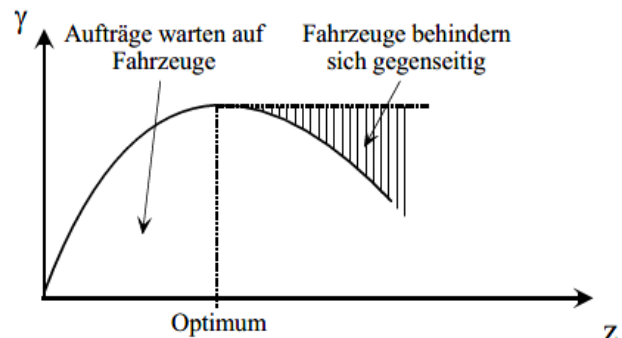


Abbildung 3. Grenzdurchsatz in Abhängigkeit der Anzahl der Fahrzeuge z [14]

Basierend auf der Literaturrecherche und der bisherigen wissenschaftlichen Auseinandersetzung mit derartigen Lagersystemen zeigt sich eine Forschungslücke hinsichtlich einer umfassenden, herstellerübergreifenden Untersuchung des Systems, mit deren Hilfe sämtliche Einflüsse und deren Wechselwirkungen dargestellt werden können. Zudem wurde in keiner Veröffentlichung bislang das Verhalten der Roboter am Lagerraster untersucht, um daraus den Grenzdurchsatz derartiger Anlagen zu berechnen bzw. numerisch anzunähern. Daraus ergeben sich folgende Forschungsfragen:

- Wie sind *Autostore*-Systeme (RCS/RS) aufgebaut und welche Parameter beeinflussen in welcher Art das Systemverhalten?
- Wie wirkt sich die Anzahl der eingesetzten Roboter bei gegebener Lagergröße auf die Umschlagleistung aus?
- Ab wann treten Behinderungen der Fahrzeuge untereinander auf?

3 SYSTEMBESCHREIBUNG

Im Zuge der Systembeschreibung soll der Aufbau von sogenannten roboterbedienten, rasterbasierten automatischen Behälterkleinteilelagern (kurz: RCS/RS, vom engl. robotic compact storage and retrieval system) dargelegt werden, um darauf aufbauend eine funktionale Beschreibung des Systems durchführen zu können.

Nachfolgend sind die wesentlichen Vorteile von *Autostore*-Lagersystemen aufgelistet: [4]

- einfacher, modularer Aufbau
- flexible Erweiterbarkeit
- hohe Lagerdichte
- hohe Raumnutzungsgrade
- vollautonom durch Roboter bedient
- Ware-zur-Person-Kommissionierung
- hohe Energieeffizienz
- hohe Systemzuverlässigkeit
- branchenunabhängige Anwendbarkeit

3.1 SYSTEMAUFBAU

Autostore-Systeme bestehen neben der Steuerung, die eine Schnittstelle zwischen dem Lagerverwaltungssystem und dem Lager selbst darstellt, aus fünf weiteren Bestandteilen, die nachfolgend beschrieben werden [4]:

3.1.1 LAGERRASTER

Der Raster oberhalb des Lagers, der in der Regel aus verschraubten Aluminium- oder Stahlprofilen besteht, dient als orthogonales Fahrschienennetz für die Roboter und als Rastereinteilung für die Lagerbehälter. Sowohl hinsichtlich der Größe des Rasters als auch in Bezug auf die Anzahl an Rasterelementen in den horizontalen Raumrichtungen gibt es keinerlei Einschränkungen. Die Höhe des Lagerrasters ergibt sich entweder anhand der Hallenhöhe oder aus der maximalen Anzahl an Kunststoffbehältern, die übereinandergestapelt werden dürfen. Auch wenn die Mindeststapelhöhe (ein Behälter) technisch möglich wäre, geben die Systemanbieter als Mindesthöhe vier Behälter an, da die Kommissionierstationen nur so durch die Roboter von oben erreicht werden können [4,7].

Am Markt sind verschiedene Raster-Fahrschienen für die Roboter erhältlich. Es gibt: [4]

- einfache Schienen (kein direktes aneinander Vorbeifahren der Roboter möglich – mindestens ein Rasterelement Abstand nötig)
- kombiniert einfach-doppelte Schienen (aneinander Vorbeifahren über die kurze Seite des Rasterelements möglich; über die lange Seite muss mindestens ein Rasterelement Abstand gehalten werden)
- doppelte Schienen (aneinander Vorbeifahren in beiden horizontalen Raumrichtungen möglich)

3.1.2 ROBOTER

Die Roboter am Raster sind batterie- oder akkubetrieben und übernehmen den gesamten Ein- und Auslagerungsprozess von und zur Kommissionierstation. Jeder Roboter verfügt über acht Räder (vier je Fahrtrichtung), von denen je vier angehoben bzw. abgesenkt werden können, um eine Fortbewegung des Roboters in eine bestimmte Richtung zu ermöglichen. Ein Wechsel der Fahrtrichtung und somit der Richtungswechsel von der Längs- zur Querrichtung oder umgekehrt dauert wenige Sekunden. Dementsprechend kann es vorteilhaft sein, die Anzahl der Fahrtrichtungswechsel je Lagerspiel möglichst gering zu halten. Dadurch wird auch die Beschleunigungs- und Abbremshäufigkeit je Lagerspiel minimiert. Angetrieben werden die Räder entweder zentral durch Keilriemen oder dezentral mittels Einzelradantrieben. Nahezu alle am Markt erhältlichen Fahrzeuge verfügen über Energierückgewinnungssysteme [4,5].

Das Zellenmaß der Roboter definiert jene Fläche, die der Roboter selbst aufgrund seiner Geometrie beansprucht. Während sich die Grundfläche älterer Baureihen zumeist über zwei Lagerfächer erstreckt, blockieren neuere lediglich ein bzw. eineinhalb Rasterzellen. Um eine Lagereinheit aus einem Stapel herauszuheben, wird ein Winkelprofil-Rahmen, das mit Behälter-Spreizhaken ausgestattet ist, durch vier Seilstränge abgesenkt. Währenddessen sind alle acht Räder des Roboters abgesenkt [4,5,7].

Weitere Unterscheidungskriterien der Fahrzeuge sind die Fahr- und Hubgeschwindigkeiten, die Beschleunigungen sowie ob der Kunststoffbehälter im Fahrzeug oder auf einem Träger außerhalb des Roboters transportiert wird. Letzteres ermöglicht das kurzzeitige Abstellen der Behälter auf der Rasterebene. Batteriebetriebene Fahrzeuge müssen, im Unterschied zu jenen, die über einen austauschbaren Akku verfügen, nach einer gewissen Betriebszeit an den Rand des Rasters fahren, um geladen zu werden [4,5,7].

Es existieren Systeme, in denen sich verschiedene Robotertypen im Einsatz befinden, wobei sich die schnelleren Robotertypen an die langsameren anpassen müssen [4].

3.1.3 BEHÄLTER

Innerhalb des Lagers wird die zu lagernde Ware in Kunststoffbehältern übereinandergestapelt. Dadurch ergibt sich eine technisch bedingte maximale Stapelhöhe der Behälter. Die Abmessungen der Grundfläche der Behälter sind, entsprechend EN 13199-3 für Verbundstapelsysteme von Kleinladungsträgern, 600 mal 400 Millimeter. In der Höhe gibt es Varianten von 200 bis 425 Millimeter. Dadurch ergeben sich Füllvolumina von zirka 45 bis 100 Liter [4].

Die Behälter können auch geteilt werden, um verschiedene Lagerartikel in einem Behälter zu bevorraten. Bis zu 32 Unterteilungen eines Kunststoffbehälters sind

möglich. Dies geschieht entweder durch dünne Trennwände oder durch Einhängen von kleineren, unterteilenden Stoff- oder Kunststoffsäcken [4,5].

3.1.4 KOMMISSIONIERSTATION

Die Kommissionierstation - auch Port genannt - verbindet die Rasterebene mit der Lagervorzone. Allgemein kann zwischen Port mit oder ohne Behälter-Aufzug unterschieden werden. Bei Letzteren wird der Behälter durch den Roboter unter Zuhilfenahme des seilbasierten Hebe-mechanismus abgesenkt. Einfache Kommissionierstationen übernehmen den auszulagernden Behälter mit einem Förderband und übergeben im Gegenzug einen einzulagernden, sodass der Roboter sein Seilwinden-Behälter-hubsystem während des Behälteraustausches im selben Schacht belassen kann [4].

Schnellere Systeme verfügen über zwei oder mehr Schwenkarme, Pufferplätze für Ein- und Auslagerbehälter oder ermöglichen den Robotern eine direkte Abgabe des Behälters auf der Rasterebene. Der Behälteraustausch in der Kommissionierstation dauert – systemabhängig - zwischen zwei und sechs Sekunden [4].

Eine Kommissionierstation kann sowohl nur zur Einlagerung, nur zur Auslagerung aber auch für Ein- und Auslagerungen eingesetzt werden. Einige Systeme werden an den Kommissionierstationen so betrieben, dass unmittelbar, nachdem ein Lagergut entnommen wurde, ein anderes, einzulagerndes Objekt in denselben Behälter eingelagert wird.

3.1.5 SPERRFLÄCHEN UND PUFFERPLÄTZE

Speziell beim Einsatz vieler Roboter und dicht nebeneinander befindlicher Kommissionierstationen kann es hilfreich sein, einige Lagerfächer in unmittelbarer Nähe zum Absenkschacht der Kommissionierstation für Einlagerungen zu sperren, um den Robotern in diesen Bereichen freie Fahrt zu ermöglichen. Speziell in diesen Bereichen können viele Roboter gleichzeitig aufeinandertreffen, wodurch zusätzliche Ein-, Aus- oder Umlagerungen in dort befindliche Lagerschächte zu Behinderungen der Fahrzeuge führen würden. Ebenso werden im Bereich derartiger Sperrflächen oftmals einzelne Pufferplätze implementiert, um Behälter zwischenzuparken. Dabei handelt es sich um Lagerplätze, auf denen ein Behälter schnell abgestellt bzw. entgegengenommen werden kann. Dadurch können Bestellungen bereits am Raster vorkommissioniert werden.

3.2 FUNKTIONSBESCHREIBUNG

Der funktionale Ablauf in einem *Autostore*-Lagersystem soll nun in weiterer Folge von der Einlagerung bis zur Auslagerung dargelegt und beschrieben werden:

3.2.1 EINLAGERUNG

Das Lagersystem wird durch die Roboter vollautonom von oben bedient. Kommt ein neuer Artikel zur Einlagerung, so wird dieser an der Kommissionierstation in einen Behälter gelegt und dies im Lagerverwaltungssystem erfasst. Dabei erfolgt die Zuweisung des Lagerplatzes, wobei verschiedene Lagerstrategien zur Anwendung kommen können. Viele Systeme arbeiten mit einer chaotischen Einlagerungsstrategie, die ausschließlich dem Zufall unterliegt, oder mit der Vorgabe, dass der nächste freie Lagerplatz angefahren werden muss. Ebenso denkbar ist eine Zonung, eine teilsortierte Einlagerung gemäß gewissen Kriterien oder eine sortengleiche Stapelung der Behälter je Lagerschacht.

Sobald ein Roboter verfügbar ist, wird der Behälter entweder durch den Roboter selbst oder durch den Aufzug der Kommissionierstation auf die Rasterebene gehoben. Anschließend erfolgt die Transportfahrt von der Kommissionierstation zum zugewiesenen Stapel. Nachdem der Behälter eingelagert wurde, ist der Einlagerungsvorgang abgeschlossen. Abbildung 4 stellt den Einlagerungsprozess eines Behälters vom Übergabepunkt bis zum Lagerplatz mit den zwei Arten des Hubvorgangs graphisch dar:

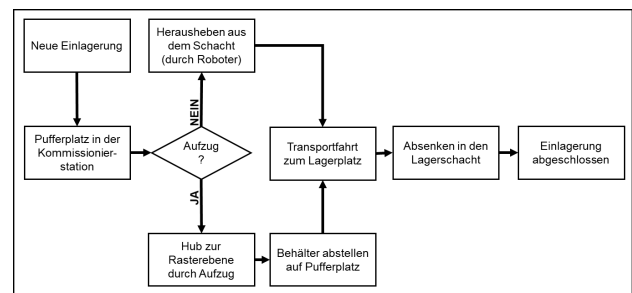


Abbildung 4. Einlagerungsprozess

3.2.2 AUSLAGERUNG OHNE UMLAGERUNG

Abbildung 5 veranschaulicht die Auslagerung eines Behälters von der Entnahme im Rasterelement bis zur Kommissionierstation:

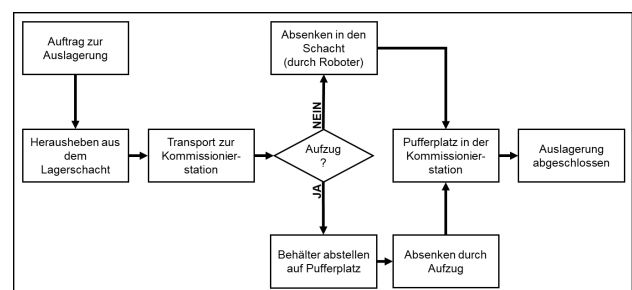


Abbildung 5. Auslagerungsprozess ohne Umlagerung

Wird ein Behälter für eine Auslagerung benötigt und der Zugriff ist direkt, ohne Umlagerung anderer Behälter möglich, so holt ein Roboter diesen aus dem

entsprechenden Rasterelement ab und transportiert ihn zur zugewiesenen Kommissionierstation. Ist der Behälter nach der Entnahme der benötigten Lagergüter leer, kann entweder eine Neueinlagerung oder eine Rückführung des Leerbehälters in das Lager erfolgen. Ebenso wäre es möglich, die Leerbehälter außerhalb des Lagers zwischenzulagern.

3.2.3 AUSLAGERUNG MIT UMLAGERUNG

Im Unterschied zum direkten Zugriff müssen bei einer Auslagerung ohne direkte Erreichbarkeit der benötigten Lagereinheit alle Behälter, die über dem angeforderten Behälter gestapelt sind, umgelagert werden. Abbildung 6 zeigt den Ablauf einer Auslagerung, im Zuge derer auch umgelagert werden muss:

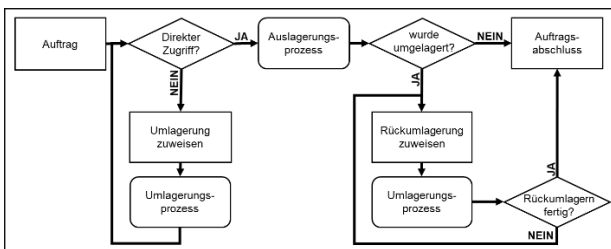


Abbildung 6. Auslagerungsprozess mit Umlagerung

Die nicht benötigten Behälter werden in die nächstgelegenen Lagerfächer umgelagert. Ziel sollte stets sein, dass das Absenken der umzulagernden Behälter möglichst rasch erfolgen kann, wodurch Rasterelemente mit niedrigen Stapelhöhen in direkter Umgebung ausgeschlossen werden

müssen. Nachdem die benötigte Lagereinheit ausgelagert und der ausgelagerte Behälter nach der Entnahme der benötigten Lagergüter wieder eingelagert wurde, gibt es Systeme, die auch Rückumlagerungen durchführen. Das bedeutet, dass ein oder mehrere Roboter die zuvor, im Zuge der Auslagerung, umgelagerten Behälter wieder in die ursprüngliche Stapelreihenfolge rückumlagern. Einfluss darauf können unter anderem die Artikelverteilung und die Zugriffsstruktur nehmen.

Damit Umlagerungen erfolgen können, dürfen nicht alle Behälterstapel bis zur maximalen Stapelhöhe gefüllt werden. Daraus ergeben sich maximale Füllgrade (inkl. Leerbehälter) von 90 bis 98 Prozent. Oftmals sind die Lager-systeme bis auf die vorletzte Ebene gefüllt. Abbildung 7 zeigt den Umlagerungsprozess, auf den auch in Abbildung 6 im Zuge der Auslagerungen mit Umlagerungen verwiesen wurde:

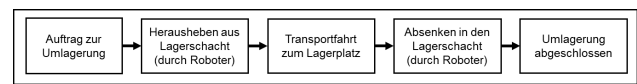


Abbildung 7. Umlagerungsprozess

3.3 EINFLUSSFAKTOREN

Sämtliche Einflüsse sowie Wechselwirkungen, die auf ein *Autostore*-Lagersystem einwirken, im bisherigen Verlauf erwähnt wurden und die Kapazität, die Fahrstrecke, die Spielzeit und somit die Umschlagleistung beeinflussen, sind in Abbildung 8 graphisch dargestellt:

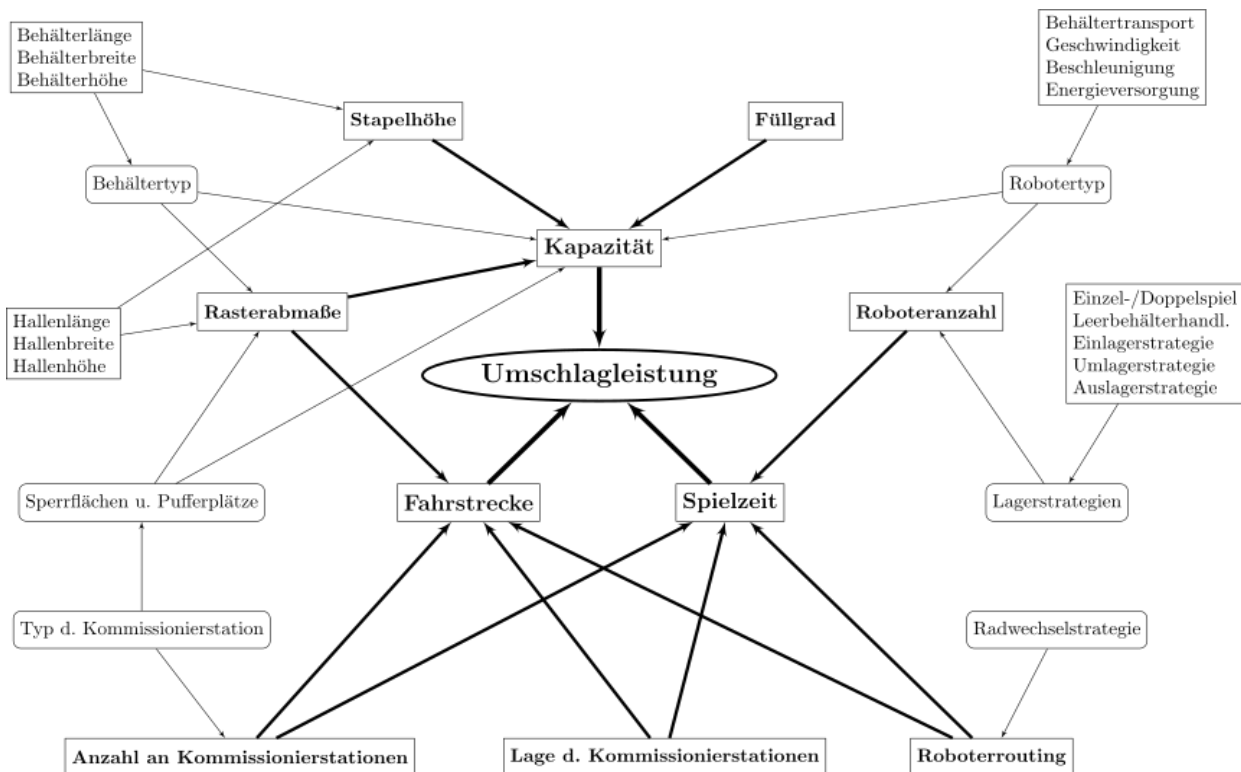


Abbildung 8. Einflüsse und Wechselwirkungen

3.4 DEFINITIONEN

Basierend auf dem in Kapitel 3.1 und 3.2 beschriebenen System werden nun allgemeine Definitionen für RCS/R-Systeme gemäß nachfolgender Abbildung 9 in Deutsch und Englisch vorgenommen. Anschließend werden die Begriffe lexikalisch definiert:

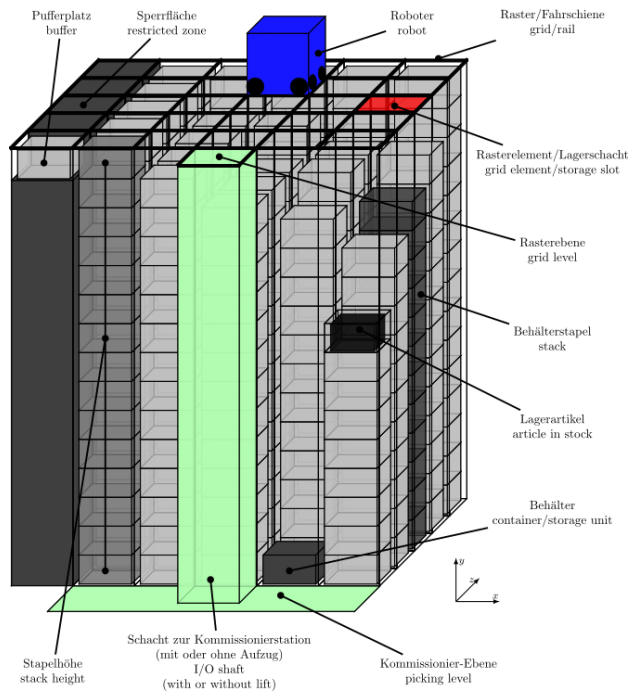


Abbildung 9. RCS/RS Definitionen

- **Behälter** (engl.: container, storage unit): entspricht der Handhabungseinheit (Lagereinheit) [15]
- **Behälteraufzug** (engl.: lift): Aufzug, der die Behälter von der Rasterebene auf die Kommissionier-Ebene absenken kann; verfügt die Kommissionierstation über einen Aufzug, so fährt dieser im Ein- und Ausschleuseschacht
- **Ein- und Ausschleuseschacht** (engl.: I/O shaft): jener Schacht, der die Rasterebene mit der Kommissionier-Ebene verbindet; die Roboter können die Behälter durch diesen Schacht absenken bzw. heben
- **Hub- und Senkvorrichtung** (engl.: lifting mechanism): jenes durch vier Seilstränge abgesenkte Winkelprofil, das die Behälter aufnehmen und abstellen kann
- **Kommissionierstation** (engl.: picking station): Arbeitsplatz, an dem die Lagerartikel aus den Behältern entnommen bzw. in die Behälter eingelagert werden; typischerweise durch einen Kommissionierer ausgeführt

- **Kommissionierebene** (engl.: picking level): jene Ebene des Lagers, auf der die Kommissionierung stattfindet
- **Lagerartikel** (engl.: article in stock): jener Artikel, der „kundenanonym“ im Lager eingelagert ist und somit in den Bestandsdaten aufscheint [15]
- **Lagerschacht** (engl.: storage slot): jenes Teilelement des Rasters, in dem der entsprechende Behälter am Stapel gelagert wird (äquivalent zum Rasterelement)
- **Pufferplatz** (engl.: buffer store): dient als Ausgleichslagerplatz, zur Zeitüberbrückung oder zum Vorkommissionieren [15]
- **Raster** (engl.: grid): Fahrschienensystem für die Roboter und die Rasterteilung für die Behälter des Stapels
- **Rasterebene** (engl.: grid level): Fahrebene der Roboter
- **Rasterelement** (engl.: grid element): jenes Teilelement des Rasters, in dem der entsprechende Behälter am Stapel gelagert wird (äquivalent zum Lagerschacht)
- **Roboter** (engl.: robot): schienengeführtes fahrerloses Transportfahrzeug am Raster, das die Behälter unter Zuhilfenahme der Hub- und Senkvorrichtung aufnehmen und absetzen kann
- **Sperrfläche** (engl.: restricted area): jene Rasterelemente, in welche keine Behälter eingelagert werden dürfen (ggf. auch durch Platten verschlossen); Roboter dürfen diese jedoch befahren
- **Stapel** (engl.: stack): Behälterstapel innerhalb eines Rasterelements
- **Stapelhöhe** (engl.: stack height): Anzahl der Behälter, die übereinandergestapelt sind (innerhalb eines Rasterelements)
- **Zellenmaß** (engl.: cell dimension): jene Fläche, die ein Roboter für seine Grundabmaße in Anspruch nimmt

4 SIMULATION

Unter Zuhilfenahme des ereignisdiskreten Simulationsprogramms *Simio* wurde eine Logik entwickelt und ein System aufgebaut, mit dem ein *Autostore*-Lagersystem hinreichend genau für eine Abschätzung der Grenzdurchsätze simuliert werden kann.

Bevor systemrelevante Annahmen, die im Rahmen der Erstellung getroffen wurden, erläutert werden, müssen einige Fachbegriffe definiert werden:

4.1 FACHBEGRIFFE

- **Entity:** Entities sind Objekte, die bearbeitet, transportiert und gelagert werden können. Sie stellen in einem Simulationsprozess beispielsweise ein Produkt, das bearbeitet oder einen Artikel, der eingelagert werden soll, dar. Sie besitzen neben generellen Eigenschaften, wie Größe und Erscheinungsbild auch eine eigene Logik, die beliebig adaptiert werden kann.
- **Node:** Die Reise einer Entity beginnt und endet immer an einem „Knotenpunkt“, einer sogenannten Node. Eine Node kann Entities in/aus Objekte/n hinein/hinaus transportieren und die Präferenz für die weitere Fortbewegung definieren.
- **Path:** Ein Path ist ein uni- oder bidirektionaler, längen- und zeitabhängiger Verbinder, der Entities oder Fahrzeuge, entsprechend ihrer definierten Geschwindigkeit, von einer Node zur anderen befördert.
- **Vehicle:** Ein Vehicle ist ein Fahrzeug, das Entities zwischen zwei Nodes transportieren kann.

4.2 SIMULATIONSMODELL

Das für dieses Paper verwendete Simulationsmodell stellt ein *Autostore*-System dar, auf dem bis zu sechs Roboter Kunststoffbehälter ein-, aus- und ggf. auch umlagern können. Kommt eine neue Lagereinheit in der Lagervorzone an, so wird diese über den Aufzug der Kommissionierstation auf die Rasterebene transportiert. Auf der Rasterebene übernimmt ein freier Roboter den neuen Behälter und transportiert diesen zum zugewiesenen Stapel. Dort senkt der Roboter den Behälter auf den Stapel ab, was im Simulationsmodell durch eine, von der Stapelhöhe sowie von der Hub- und Senkgeschwindigkeit abhängige, variable Übergabezeit implementiert ist.

Auslagerungen werden zufällig generiert. Sobald eine Lagereinheit ausgelagert werden muss, wird ihr ein Roboter zugewiesen, der sie abholt. Ist kein direkter Zugriff möglich, so werden zuvor alle darüber gelagerten Behälter auf benachbarte Stapel umgelagert. Die auszulagernde Lagereinheit wird durch den Roboter zu einer Kommissionierstation transportiert und dort an den Aufzug, der den Behälter nach unten in die Lagervorzone transportiert, übergeben. Anschließend nimmt der Roboter einen einzulagernden Behälter von der Kommissionierstation auf und transportiert diesen zu entsprechenden Stapel. Nachfolgende Abbildung 10 zeigt eine schematische Darstellung eines *Autostore*-Lagersystems samt der Anordnung der drei Kommissionierstationen:

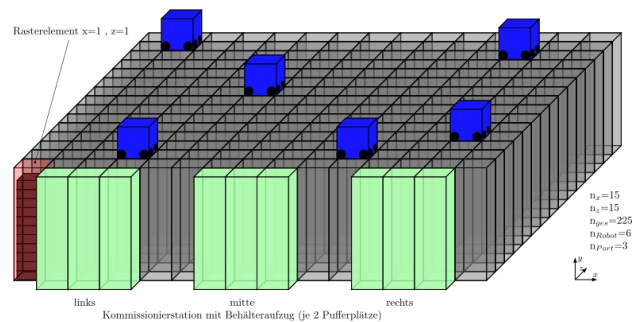


Abbildung 10. Schematische Darstellung des Rasters

Nachfolgend sollen die geometrischen und kinematischen Daten, die als Eingangsgrößen in der Simulation verwendet werden, vorgestellt werden:

Raster:

Fachanzahl.....	15 x 15
Fachabmessungen.....	700 x 500 mm
Füllgrad.....	variabel bis 98 %
Stapelhöhe.....	variabel 10 bis 22

Roboter:

Zellenmaß.....	1 Zelle
Anzahl Roboter.....	variabel 1 bis 6
Geschwindigkeit.....	$v_{Rob} = 4,0$ m/s
Ver- u. Entriegelzeit.....	$t_{V/E} = 1,0$ s
Hubgeschwindigkeit.....	$v_y = 1,6$ m/s
Senkgeschwindigkeit.....	$v_y = 1,6$ m/s

Behälter:

Behältermaße.....	650 x 450 mm
Behälterhöhe.....	425 mm

Kommissionierstation:

Anzahl Stationen.....	variabel 1 bis 3
Pufferplätze Rasterebene.....	je 1
Pufferplätze Vorlager.....	je 1
Austauschzeit.....	$t_{Tausch} = 2$ s
Geschwindigkeit Lift.....	$v_{Lift} = 2,5$ m/s

Der Simulation liegen folgenden Annahmen zu Grunde:

- Eine Entity ist gleichzeitig Behälter und Lagerartikel (keine Artikelstruktur, etc.).
- Die Einlagerung erfolgt chaotisch; es wird keine Vorsortierung oder Bereichsgliederung vorgenommen.
- Die Arbeit durch einen Kommissionierer oder einen Greifarmroboter am Kommissionierport ist nicht Untersuchungsgegenstand dieser Arbeit und wird daher nicht betrachtet.

Nachfolgende Abbildung 11 zeigt das Simulationsmodell des Lagersystems mit vier Robotern:

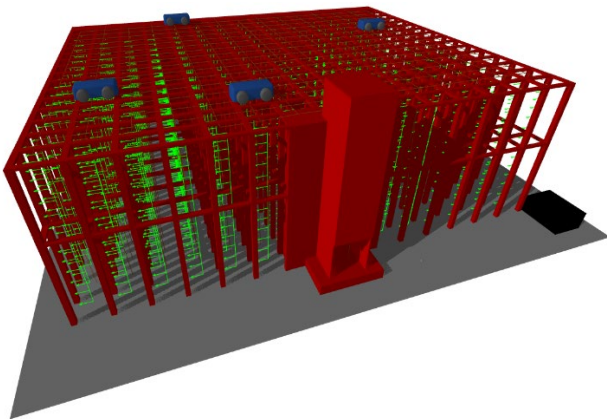


Abbildung 11. Simulationsmodell des Autostore-Systems

Grundsätzlich sei erwähnt, dass mit diesem Modell hinsichtlich der nachfolgenden sechs Gesichtspunkte unterschiedliche Szenarien ausgewertet werden können:

- Variation der Stapelanzahl
- Variation der Portanzahl
- Variation der Roboteranzahl
- Variation der Stapelhöhe
- Variation des Füllgrades
- Variation des Betriebszustandes

Der Fokus in diesem Paper liegt am auftragsbezogenen Kommissionierbetrieb. Dabei finden Ein- und Auslagerungen statt und sowohl die Roboter am Raster als auch die Aufzüge der Kommissionierstationen arbeiten im Doppelspielbetrieb. Je Szenario wurden für die Auswertungen dreißig Replikationen durchgeführt.

5 ERGEBNISSE

Das untersuchte System besteht aus sechs Robotern und drei Kommissionierstationen samt im Doppelspiel arbeitendem Aufzug sowie einer Lagergröße von 225 Stapeln (15 mal 15).

Nachfolgende Abbildung 12 zeigt die Umschlagleistung in Abhängigkeit von der Stapelhöhe und vom Füllgrad. Man sieht, dass sich die Umschlagleistung umgekehrt proportional zum Füllgrad und zur Stapelhöhe verhält.

Dabei kann man erkennen, dass für praxisnahe Füllgrade von 75 bis 95 Prozent rund 100 bis 160 Behälter pro Stunde ein- und ausgelagert werden. Je voller das Lager gefüllt und je höher gestapelt wird, desto weniger Durchsatz lässt sich erzielen. Dies lässt sich auf die vermehrte Notwendigkeit von Umlagerungsvorgängen zurückführen.

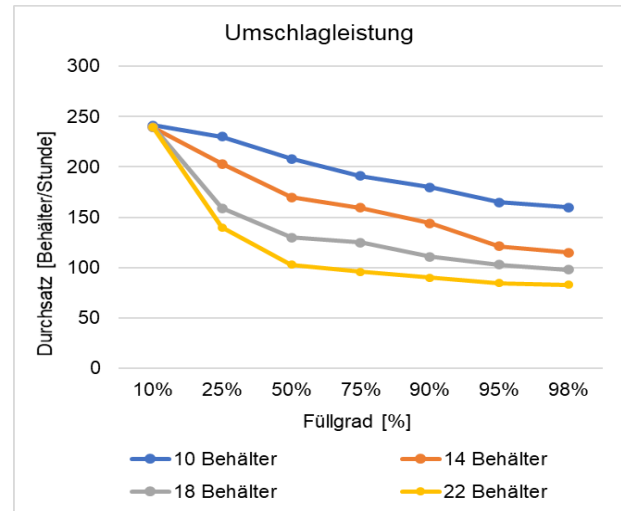


Abbildung 12. Umschlagleistung (6 Roboter, 3 Stationen)

Die Häufigkeit von Umlagerungen hat demnach den größten Einfluss auf die Umschlagleistung eines solchen Systems. Abbildung 13 visualisiert jene Anzahl der Umlagerungsvorgänge, die notwendig ist, um 2.500 Behälter auszulagern:

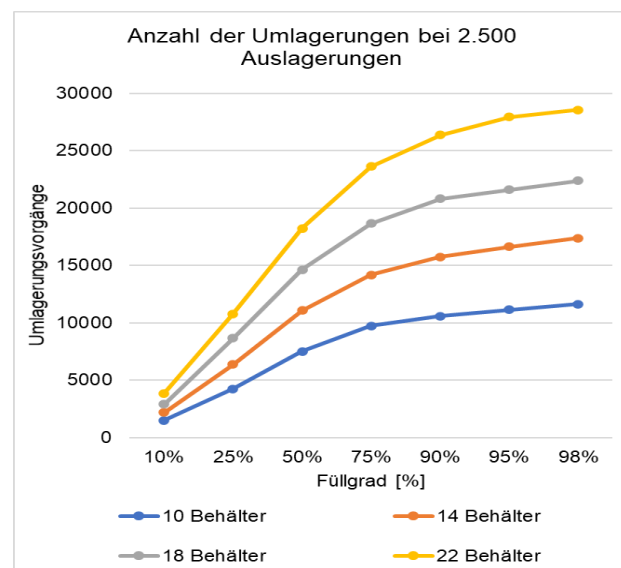


Abbildung 13. Umlagerungsanzahl (6 Roboter, 3 Stationen)

Erwartungsgemäß zeigt sich, dass die meisten Umlagerungsvorgänge dann erforderlich sind, wenn die Behälter am höchsten gestapelt werden. In sehr vollen Lagern müssen durchschnittlich – abhängig von der Stapelhöhe – vier bis zwölf Behälter umgelagert werden, um einen Behälter auszulagern. Gerade im Zuge von Umlagerungen sind oftmals viele Roboter in einem sehr kleinen Bereich des Rasters unterwegs, um gemeinsam den Auftrag abzuwickeln. Dabei können offensichtlich Behinderungen der Roboter untereinander auftreten, die dafür sorgen, dass Deadlocks entstehen.

Nachfolgend werden aufbauend auf dem beschriebenen Basismodell mit sechs Robotern die Grenzen von *Autostore*-Systemen weiter ausgelotet werden, weshalb eine Reduktion der Anzahl an Robotern erfolgt. Dazu wird die Stapelhöhe auf 14 Behälter beschränkt. Überdies werden nur noch die praxisrelevanten Füllgrade 75, 90 und 95 Prozent betrachtet und die Anzahl der in betrieb-befindlichen Kommissionierstationen auf lediglich eine reduziert. Die ausschließliche Verwendung der mittleren Kommissionierstation soll andere Einflüsse vermeiden, auch wenn die Umschlagleistung etwas sinkt. Abbildung 14 bestätigt somit qualitativ, was durch Abbildung 3 [14] vermutet wurde.

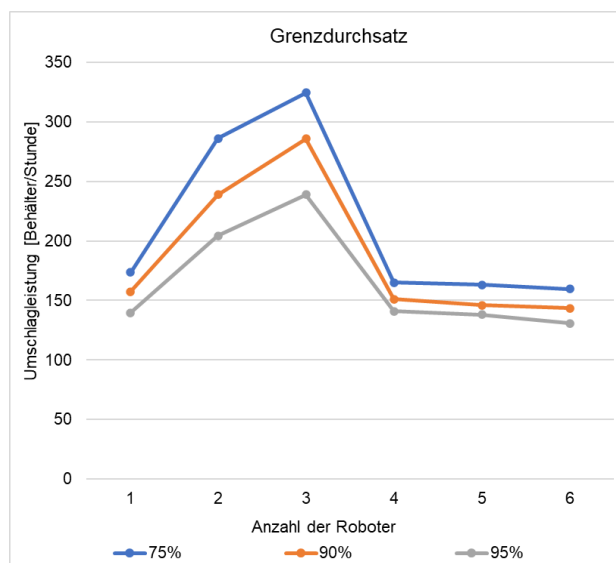


Abbildung 14. Grenzdurchsatz in Abhängigkeit der Roboteranzahl für verschiedene, hohe Füllgrade (Raster 15x15)

Reduziert man die Anzahl der Roboter am Raster sukzessive, so zeigt sich das Optimum bei drei Robotern. Die Vermutung, dass sechs Roboter für diese Rastergröße zu viel sind, bestätigt sich hiermit. Es sei an dieser Stelle erwähnt, dass 15 Rasterelemente je Richtung verglichen mit realen Systemen als klein betrachtet werden müssen. Große Systeme haben Abmessungen von bis 200 mal 200 Rasterelementen und bieten Platz für rund 500.000 Behälter. Dennoch kann die Rastergröße dieser Simulation wertvolle Erkenntnisse liefern, zumal davon ausgegangen werden kann, dass bei größeren Systemen ein ähnlicher Lagerhaltungs- und Routingalgorithmus angewandt wird.

Hinsichtlich der Anzahl der Roboter am Raster dürften 750 bis 1.000 Behälter bzw. rund 75 Lagerfächer pro Roboter gute Richtwerte sein. Dies bestätigt sowohl die in Kapitel 2 angeführte Untersuchung von Galka et al. [12] als auch eine durch den Autor dieses Papers, sich noch in Bearbeitung befindliche, durchgeführte Systemrecherche, wonach ein Roboter zwischen 500 und 1.000 Behälter bedient. Im realen Betrieb sind Wartungs- sowie Ladezeiten ebenfalls zu berücksichtigen. Rund 1.000 Behälter bedeuten, abhängig von der Stapelhöhe, dass für einen Rasterabschnitt von 50 bis 100 Stapeln ein Roboter eingesetzt wird.

6 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Zunehmender Onlinehandel und Lieferkettenprobleme sind nur zwei Argumente dafür, warum *Autostore*-Lagersysteme in den vergangenen Jahren immer häufiger zum Zwecke der Kleinteillagerung und -kommissionierung eingesetzt werden. Die Zahl der weltweiten Systeme steigt kontinuierlich. Dennoch existieren kaum valide und allgemeine Aussagen zu Umschlagleistung und Spielzeit. In den wenigen vorhandenen wissenschaftliche Auseinandersetzungen wurden zumeist spezifische Systemzustände betrachtet, die entweder stark vereinfachten oder nicht alle Einflüsse unabhängig voneinander untersuchten. Dieses Paper bietet eine Aufstellung, welche Parameter existieren, welche Einflüsse auf das System wirken und wie diese interagieren. Zudem wurde der Frage nachgegangen, wie sich die Roboter, die das Herzstück des Systems darstellen, untereinander verhalten, wo der Grenzdurchsatz bei gegebener Rastergröße liegt und wie sich dieser im Verhältnis zur Anzahl der Stapel verhält. So konnte ein Richtwert hinsichtlich der Stapel pro Roboter aus empirischen Systemrecherchen mithilfe der diskreten Ereignissimulation bestätigt werden.

Zukünftig sollen Simulationen mit größeren Rasterabmessungen und optimierten Roboterroutings untersucht werden. Die Verwendung verschiedener Artikelstrukturen oder anderer Parametervariationen und -kombinationen könnte weitere Erkenntnisse zu den Lagerhaltungsstrategien von *Autostore*-Systemen liefern. Zudem soll eine analytische Berechnung entwickelt werden. Einerseits zur Validierung der numerischen Simulation und zum Erkennen optimaler Betriebszuständen, andererseits um Vergleiche mit anderen Lagersystemen, wie beispielsweise Shuttlesystemen, anstellen zu können.

LITERATUR

- [1] SZ, „Chinas Lockdowns und der Krieg belasten den Welthandel schwer“, *Süddeutsche Zeitung*, 13.06.2022, [Online]. Verfügbar: www.sueddeutsche.de/wirtschaft/china-lockdowns-ukraine-krieg-lieferketten-welthandel-1.5602211, [zugegriffen am 14.06.2022]
- [2] J. Koenen, „Lockdowns in China, Streikgefahr in den USA: In der Logistik droht neues Chaos“, *Handelsblatt*, 18.03.2022. [Online], Verfügbar: www.handelsblatt.com/unternehmen/handel-konsumgueter/globaler-warenverkehr-lockdowns-in-china-streikgefahr-in-den-usa-in-der-logistik-droht-neues-chaos/28176614.html [zugegriffen am 14.06.2022]
- [3] T. Jäkle, „Online-Handel boomt über die Pandemie hinaus“, *Trend*, 08.09.2021. [Online], Verfügbar: www.trend.at/wirtschaft/online-handel-corona-pandemie-12230326, [zugegriffen am 13.06.2022]

- [4] Autostore-System, [Online], Verfügbar: www.autostoresystem.com [zugegriffen am 10.06.2022]
- [5] Ocado-Group, [Online], Verfügbar: www.ocado.com/our-solutions/what-is-osp/, [zugegriffen am 10.06.2022]
- [6] M. ten Hompel, T. Schmidt, J. Dregger, Materialflusssysteme, Förder- und Lagertechnik, 4. Auflage, Springer Verlag, Berlin, 2018
- [7] M. ten Hompel, T. Bauernhansl, B. Vogel-Heuser, Handbuch Industrie 4.0, Band 3: Logistik, 3. Auflage, Springer Verlag, Berlin, 2020
- [8] K.-H. Wehking, Technisches Handbuch Logistik 1, Fördertechnik, Materialfluss, Intralogistik, Springer Verlag, Berlin, 2020
- [9] B. Zou, R. De Koster, X. Xu, Evaluating dedicated and shared storage policies in robot-based compact storage and retrieval systems, Rotterdam School of Management, Erasmus University, 2016
- [10] M. Beckschäfer, S. Malberg, K. Tierney, C. Weskamp, Simulating storage policies for an automated grid-based warehouse system, University of Paderborn, Decision Support & Operations Research Lab, 2017
- [11] K. Azadeh, R. De Koster, D. Roy, "Robotized and Automated Warehouse Systems: Review and Recent Developments", Transportation Science, Vol. 53, No. 4, S. 917-945, 2019, doi: 10.1287/trsc.2018.0873
- [12] S. Galka, C. Scherbarth, L. Troesch, Autostore – Was Nutzer über das System berichten können, Ergebnisse einer Online-Umfrage, OTH Regensburg, doi: 10.35096/othr/pub-646
- [13] S. Galka, C. Scherbarth, "Simulationsbasierte Untersuchung der Grenzproduktivität von Robotern in einem AutoStore-Lagersystem", Simulation in Produktion und Logistik 2021, Cuvillier Verlag, Göttingen, 2021
- [14] D. Arnold, K. Furmans, Materialfluss in Logistiksystemen, 7. Auflage, Springer Verlag, Berlin, 2019
- [15] M. ten Hompel, V. Heidenblut, Taschenlexikon Logistik, Abkürzungen, Definitionen und Erläuterungen der wichtigsten Begriffe aus Materialfluss und Logistik, 3. bearbeitete und erweiterte Auflage, Springer Verlag, Berlin, 2011

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

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

Dipl.-Ing. Dr. Michael Eder, Senior Scientist 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 01-30754, Fax +43 1 588 01 30799, Email: philipp.trost@tuwien.ac.at