

RCS/RS mit einem Roboter – Analytische Betrachtung des Durchsatzes

RCS/RS with one robot – analytical throughput investigation

Philipp Trost
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

Kurzbeschreibung: RCS/R-Systeme werden nicht zuletzt aufgrund der stetig wachsenden Herausforderungen der Logistik hinsichtlich der Lieferengpässe, des Fachkräftemangels und der voranschreitenden Digitalisierung kontinuierlich mehr. Dennoch gibt es kaum Aussagen zu deren Durchsatz. Das vorliegende Paper präsentiert einen analytischen Berechnungsansatz zur Abschätzung des Durchsatzes von derartigen Lagersystemen mit einem Roboter am Raster. Dabei handelt es sich um ein Spielzeitmodell mit einer gleichverteilten Zugriffsstruktur. Der analytische Ansatz wird mit Hilfe einer diskreten Ereignissimulation validiert. Die Eingangsparameter stammen von europäischen RCS/RS-Herstellern. Der vorgestellte Ansatz ist ein einfacher und mit Standardberechnungsprogrammen rasch lösbarer.

[Schlüsselwörter: Automatisches Lagersystem, Rasterförmiges Lager, RCS/RS, Spielzeitmodell, diskrete Ereignissimulation]

Abstract: RCS/R systems are constantly increasing, not least because of the ever-growing challenges in logistics with regard to supply bottlenecks, the shortage of workers and advancing digitization. Nevertheless, there are hardly any statements about their throughput. This study presents an analytical calculation approach to estimate the throughput of such storage systems with one robot operating on the grid. Therefore, a cycle time model with evenly distributed access structures is developed. The analytical approach is validated using a discrete event simulation and their results are compared. The input parameters originate from a European materials handling provider. The approach presented is simple and can be solved quickly by using standard calculation programs.

[Keywords: Automated storage system, Grid based storage system, RCS/RS, Cycle time model, Discrete event simulation]

1 EINLEITUNG

Durch Roboter von oben oder unten bediente automatische Behälterkleinteilelager (RCS/RS) zeichnen sich durch sehr hohe Lagerdichte, hohe Umschlagleistung sowie redundanzbedingt durch hohe Zuverlässigkeit und modulare Skalierbarkeit aus. In derartigen Lagersystemen, wie sie u.a. von den Firmen AutoStore, Ocado oder Jungheinrich angeboten werden, werden Güter in rasterförmig angeordneten Behälterstapeln gelagert. Da weder allgemeine Informationen zur Leistung derartiger Systeme noch analytische Ansätze zur Approximation des Durchsatzes existieren, sind sowohl der Vertrieb als auch die Kunden nach wie vor auf die individuellen Simulationsmodelle der Hersteller angewiesen.

Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist es daher, den Durchsatz eines RCS/R-Systems mit einem Roboter mittels analytischer Näherungsberechnung abzuschätzen. Mit Hilfe eines zeitkontinuierlichen und wegdiskreten Spielzeitmodells wird ein probabilistischer analytischer Ansatz zur Durchsatzberechnung eines RCS/RS mit einem Roboter und einer Kommissionierstation vorgestellt.

Daraus lassen sich die folgenden Forschungsfragen ableiten, die im Rahmen dieses Papers Beantwortung finden sollen:

- Wie kann der Durchsatz eines RCS/RS mit einem Roboter und einer Kommissionierstation analytisch abgeschätzt werden?
- Wie können die Ergebnisse mittels einer diskreten Ereignissimulation des Systems validiert werden?
- Wie kann ein RCS/RS mit einem Roboter für ein gegebenes Parametersetting hinsichtlich des Durchsatzes dimensioniert werden?

Ziel dieses Papers ist es, neben einer umfassenden Literaturrecherche in Kapitel 2, den Aufbau und die Funktionsweise des untersuchten Lagersystems zu beschreiben (Kapitel 3) und darauf aufbauend in Kapitel 4 den analytischen Berechnungsansatz vorzustellen, um rasch und einfach den Durchsatz eines RCS/RS mit einem Roboter berechnen zu können. Die Ergebnisse sollen in Kapitel 5 validiert werden, indem diese mit denen einer diskreten Ereignissimulation verglichen werden.

2 LITERATUR

Eine der ersten Erwähnungen von RCS/R-Systemen in einem einschlägigen Fachbuch erfolgte 2018 durch ten Hompel et al. [1]. Vorteilhaft – so ist hier zu lesen - seien der hohe Raumnutzungsgrad, der modulare Aufbau sowie die damit einhergehende einfache und flexible Erweiterbarkeit. Das Handbuch Industrie 4.0 [2] ergänzt die hohe Effizienz in der Ware-zur-Person-Kommissionierung. Wehking [3] unterstreicht die flexible Anordnung sowie die hohe Lagerdichte zufolge des Entfalls der Lagergassen.

Zou et al. [4] untersuchten ein AutoStore-System und verglichen die chaotische mit der sortierten Lagerhaltungsstrategie und leiteten optimale Längen-zu-Breiten-Verhältnisse ab. 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“. Die 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 verloren ginge.

Beckschäfer et al. [5] entwickelten eine diskrete Ereignissimulation (DES), mit deren Hilfe Lagerhaltungsstrategien für RCS/RS gefunden werden sollten, die sich positiv auf die Effizienz des Lagers auswirken. Dabei wurde lediglich eine Systemkonfiguration mit fixen Parametern wie Füllgrad, Stapelhöhe, etc. betrachtet. Der Fokus wurde auf die strategische Frage gelegt, ob ein neuer Wareneingang in einen leeren oder in einen bereits mit demselben Produkt teilweise befüllten Behälter eingelagert werden soll.

Galka et al. [6,7] veröffentlichten zwei Publikationen zu RCS/R-Systemen, wobei sich eine mit einer Nutzerumfrage und der Ableitung von empirischen Kennzahlen beschäftigt. Im zweiten Paper wurde eine Simulationsstudie erstellt, um den Einfluss der Anzahl von Robotern auf die Systemleistung zu eruieren. Die Stapelhöhe wurde ebenso wie die Rastergröße als fix angenommen. Erwartungsgemäß wurden die höchsten Umschlagleistungen erzielt, wenn am wenigsten umgelagert werden musste.

Chen et al. [8] untersuchten mittels Simulation Overhead RCS/RS mit Brückenkränen, Tjeerdsma [9] entwickelte eine Simulation zum Re-Design eines Lagers der holländischen Post, Hameed et al. [10] versuchten das Roboterouting entlang der Pfade numerisch zu optimieren, Trost et al. [11] simulierten Systeme mit umfangreichen Parametervariationen hinsichtlich der Geometrie und der Fahrzeuganzahl und Ko et al. [12] stellten einen einfach anwendbaren, heuristischen Algorithmus zur optimalen Auftragssequenzierung vor.

Trost et al. [13,14] unternahmen den Versuch, eine herstellerunabhängige Beschreibung und Definition zu erstellen, die sämtliche Einflussgrößen, Abhängigkeiten und Wechselwirkungen derartiger Systeme darstellten. Kartnig et al. [15] ergänzten die Systemvorstellung klassischer RCS/RS um spezielle, neue Lösungen, wie beispielsweise jene des Jungheinrich Powercube und verglichen technische, logistische und strategische Aspekte.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Forschung im Bereich der RCS/R-Systeme im Vergleich mit den klassischen Regalbediengerät (RBG) oder den Shuttlesystemen (SBS/RS) noch in den Anfängen steckt. Abgesehen von einigen numerischen Simulationen und einem analytischen Ansatz muss immer noch auf die Informationen der Systemhersteller zurückgegriffen werden. Ähnlich wie die analytischen Ansätze von RBGs für Shuttlesysteme erweitert wurden, sollen die Ansätze der Shuttlesysteme für die Durchsatzberechnung von RCS/RS weiterentwickelt werden. Das relevanteste Paper stammt von Eder [16]. Dabei handelt es sich um eine Durchsatz-Berechnung für mehrfachtiefe und mehrfachhohe SBS/RS. Sein Ansatz soll im Rahmen dieses Papers erweitert werden, da die Einfachheit des bestehenden Formelapparates eine einfache und rasche Lösung mit Standardberechnungsprogrammen ermöglicht.

3 SYSTEMBESCHREIBUNG

Das behandelte System ist ein vollautomatisches, roboterbedientes, rasterförmig angeordnetes Behälterlager. Die vier Grundbestandteile sind:

- Kunststoffbehälter
- Roboter
- Raster
- I/O-Schacht mit Kommissionierstation

Eine detaillierte Beschreibung des Aufbaus (vgl. Abbildung 1) und der Prozesse kann u.a. in [13] gefunden werden. Basierend auf [15] existieren herstellerbedingt unterschiedliche Betriebsmodi. Während manche Anbieter - vor allem jene, deren Kunden über eine ausgeprägte ABC-ähnliche Artikelstruktur verfügen – sämtliche Umlagerungen wieder rückumlagen und somit versuchen, Behälter

mit häufig benötigten Inhalten weiter oben im Lager zu bevorraten, gibt es auch Systeme, die typischerweise ohne Rückumlagerungen betrieben werden.

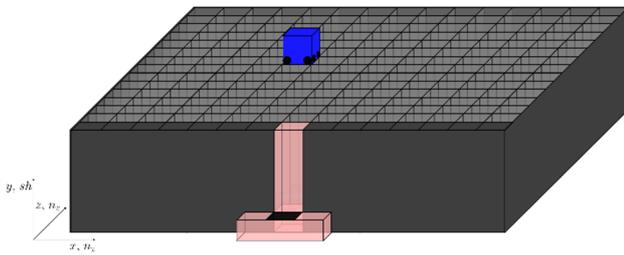


Abbildung 1. Schematische Darstellung eines RCS/RS

Die wichtigsten Annahmen, die im weiteren Verlauf dieses Paper getroffen werden, sind nachfolgend gelistet:

- Die Roboter arbeiten im Einzel- oder Doppelspielbetrieb
- Die Aufträge werden gemäß der FCFS-Regel abgearbeitet.
- Der I/O-Schacht ist entlang einer Kante in x-Richtung angeordnet.
- Für eine maximale Durchsatzbetrachtung wird vorausgesetzt, dass immer Ein- und Auslageraufträge vorhanden sind.
- Die Behälter sind gleichverteilt über alle Stapelhöhen eingelagert. Überdies wird eine gleichverteilte Zugriffswahrscheinlichkeit angenommen.
- Ein umzulagernder Behälter wird immer zum nächstgelegenen Stapel, der Platz bietet, umgelagert.
- Etwaige Rückumlagerungen erfolgen in der umgekehrten Umlagerreihenfolge.
- Der Füllgrad wird auf einen realistischen Wert begrenzt ($\leq 98\%$), sodass die Möglichkeit von Umlagerungen gewährleistet ist.

4 ANALYTISCHER ANSATZ

Der analytische Ansatz basiert auf Eders Ansatz für Shuttlesysteme aus dem Jahr 2020 [16]. Darin wurde ein analytischer Ansatz zur Berechnung der Umschlagleistung von mehrfach tiefen und -hohen Shuttlesystemen (SBS/RS) vorgestellt. Da Shuttlesysteme üblicherweise mit einem Lift arbeiten, wird das hochdynamische Zusammenspiel von Lift und Shuttle durch einen Warteschlangenansatz berücksichtigt. Für die Spielzeitberechnung der Shuttles wurde ein Spielzeitmodell verwendet. Analog dazu wird in diesem Paper ein Spielzeitmodell für RCS/R-Systeme mit einem Roboter vorgestellt. Ein Formelzeichen-Verzeichnis findet sich im Anhang wieder.

Dabei kann die Spielzeit in die folgenden Zeitanteile unterteilt werden:

- Fahrzeit des Roboters vom I/O-Schacht zum Stapel bzw. vom Stapel zum I/O-Schacht t_{ES}
- Fahrzeit des Roboters von einem Stapel zu einem anderen Stapel t_{DS} (im Doppelspielbetrieb)
- Hub-/Senkzeit des Behälters vom/auf den Stapel durch den Roboter t_{HS}
- Umlagerzeit t_U (falls Umlagerungen notwendig sind) bestehend aus:
 - Fahrzeit zum/vom Umlagerstapel vom/zum Auslagerstapel $t_{U,F}$
 - Hub-/Senkzeit des Behälters vom/auf den Stapel durch den Roboter t_{HS}
 - (unter Berücksichtigung der Umlagerwahrscheinlichkeit w_U)

Aufgrund der Berücksichtigung der Beschleunigung des Roboters muss vorab eine Unterscheidung getätigt werden, sodass die Wegzeit des Roboters gemäß den nachfolgenden Gleichungen (1) und (2) berechnet wird:

Falls $l < \frac{v^2}{a}$ gilt (Dreiecksfahrt), ergibt sich die Wegzeit des Roboters zu (Gleichung (1)):

$$t(l) = 2 \cdot \sqrt{\frac{l}{a}} \quad (1)$$

Wird die maximale Geschwindigkeit des Roboters erreicht (Trapezfahrt), so gilt Gleichung (2):

$$t(l) = \frac{l}{v} + \frac{v}{a} \quad (2)$$

4.1 SPIELZEIT

Mit Hilfe des nachfolgenden Spielzeitmodells können drei grundlegende Betriebsmodi berechnet werden:

- Einlagerbetrieb (Einzelspiel)
- Auslagerbetrieb (Einzelspiel)
- Ein- und Auslagerbetrieb (Einzel- oder Doppelspiel)

Da RCS/R-Systeme für gewöhnlich im Doppelspiel arbeiten [15] und demnach einen Behälter ins Lager einlagern, nachdem ein anderer Behälter ausgelagert wurde, werden die folgenden beiden besonders relevanten Spielzeitansätze dargelegt:

Systeme, die typischerweise über eine homogene Zugriffsstruktur verfügen, arbeiten ohne Rückumlagerungen [15]. Die Spielzeit eines Roboters setzt sich daher wie folgt zusammen (Gleichung (3)):

$$t_{S,DS} = 2 \cdot t_{ES} + t_{DS} + 2 \cdot t_{HS} + w_U \cdot t_U + t_{IO} \quad (3)$$

Handelt es sich hingegen um Lagersysteme mit einer inhomogenen Zugriffsstruktur (klassenbasierte Verteilung, z.B. ABC) und es finden Rückumlagerungen statt [15], so dass der selbstsortierende Effekt ausgenutzt werden kann, berechnet sich die Spielzeit gemäß nachfolgender Gleichung (4):

$$t_{S,DS,RU} = 2 \cdot (t_{ES} + t_{DS} + 2 \cdot t_{HS} + w_U \cdot t_U) + t_{IO} \quad (4)$$

4.2 FAHRZEITEN

Die Fahrzeit für ein Einzelspiel kann mit der nachfolgenden Gleichung (5) berechnet werden:

$$t_{ES} = \frac{1}{n_x} \cdot \frac{1}{n_z} \cdot \sum_{k=1}^{n_x} \sum_{l=1}^{n_z} t(l \cdot \Delta z) + t((|k - k_0|) \cdot \Delta x) + t_{RW} \cdot \text{sign}(|k - k_0|) \quad (5)$$

Darin beschreibt der erste Term die Fahrzeit in z-Richtung. Ist kein Richtungswechsel erforderlich, also der Ausdruck $|k - k_0| = 0$, so ist auch kein Radwechsel erforderlich und sowohl der zweite als auch der dritte Term werden null. Erfolgt ein Richtungswechsel, indem der Roboter nach der Fahrt in die z-Richtung anhält, die aktiven Räder wechselt und die Fahrt zum Stapel in x-Richtung fortsetzt. In diesem Fall ergibt sich aus der Signumsfunktion für $|k - k_0| > 0$ der Wert 1 und nur dann wird der zeitliche Verzögerungsanteil zufolge des Richtungswechsels berücksichtigt.

Im Doppelspielbetrieb muss zusätzlich der zeitliche Anteil der Fahrt vom ersten zu einem zweiten Stapel berücksichtigt werden. Gleichung (6) stellt dies dar:

$$t_{DS} = \frac{1}{n_x^2} \cdot \frac{1}{n_z^2} \cdot \sum_{k=1}^{n_x} \sum_{l=1}^{n_x} \sum_{m=1}^{n_z} \sum_{n=1}^{n_z} t(|m - n| \cdot \Delta z) + t((|k - l|) \cdot \Delta x) + t_{RW} \cdot \text{sign}((|k - l|) \cdot (|m - n|)) \quad (6)$$

Hierbei kann es ebenso vorkommen, dass kein Richtungswechsel notwendig ist, und zwar dann, wenn der nächste Stapel entweder entlang der x-Achse oder entlang der z-Achse liegt und somit entweder $|m - n| = 0$ oder $|k - l| = 0$ ist. Dies ist in der Signumsfunktion multiplikativ berücksichtigt.

4.3 HUB- UND SENKZEIT

Die Hub- und Senkzeit kann mittels Gleichung (7) berechnet werden. Diese basiert auf [16] für bis zu fünffachtiefe SBS/RS und wurde für RCS/RS entsprechend adaptiert, sodass auch große Stapelhöhen berechnet werden können.

$$t_{HS} = t_{VE} + \sum_{n=1}^{sh} \sum_{i=0}^{n-1} \frac{1}{sh + 4 \cdot i} \cdot \binom{sh-1}{i} \cdot f^{sh-1-i} \cdot (1-f)^i \cdot 2 \cdot \frac{h_B}{v_y} \cdot n \quad (7)$$

Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Stapel besetzt ist, wird in Formel (7) durch den Füllgrad f^{sh-1-i} beschrieben. Analog dazu wird die Wahrscheinlichkeit eines freien Lagerplatzes auf einem Stapel durch den Term $(1-f)^i$ berücksichtigt.

4.4 UMLAGERZEIT

Für Stapelhöhen von $sh > 1$ müssen ggf. erforderliche Umlagerungen berücksichtigt werden. Dies führt zu einer Verlängerung der Spielzeit. Unter der Annahme gleichverteilter Zugriffswahrscheinlichkeiten auf jeden Stapel und über die gesamte Stapelhöhe ergibt sich die Anzahl der Umlagerungen, die erforderlich sind, um einen Behälter auszulagern, gemäß Gleichung (8). Dabei ist der Füllgrad des Lagers zu berücksichtigen.

$$w_U = \sum_{n=0}^{sh-2} \sum_{i=1}^{sh-1-n} \frac{i}{sh-n} \cdot \binom{sh}{n} \cdot f^{sh-n} \cdot (1-f)^n \quad (8)$$

Während der Ausdruck f^{sh-n} für die Wahrscheinlichkeit eines belegten Stapels steht, beschreibt der letzte Term $(1-f)^n$ die Wahrscheinlichkeit, einen Stapel vorzufinden. Ein nahezu volles Lager mit Stapelhöhe $sh = 2$ führt zu $w_U = 0,5$. Damit ist durchschnittlich bei jeder zweiten Auslagerung eine Umlagerung erforderlich.

Die Umlagerfahrzeit hängt stark von der angewandten Umlagerstrategie ab. Unter der Annahme einer Umlagerung zum nächstgelegenen freien Stapel im Umkreis des Auslagerstapels kann die Fahrzeit für einen Umlagerungszyklus gemäß nachfolgender Gleichung (9) angenähert werden:

$$t_{U,F} = \sum_{i=1}^{n_x} \sum_{j=1}^{n_z} \frac{f^{sh(1+2 \cdot (n-1))^2-1} \cdot (1-f^{sh^{8^n}})}{n} \cdot 2 \cdot (t(i \cdot \Delta x) + t(j \cdot \Delta z)) + t_{RW} \cdot \text{sign}(|i - j|) \quad (9)$$

Obige Annahme basiert auf der nachfolgenden Skizze (Abbildung 2) und auf Eders Ansatz für mehrfachtiefe SBS [17]:

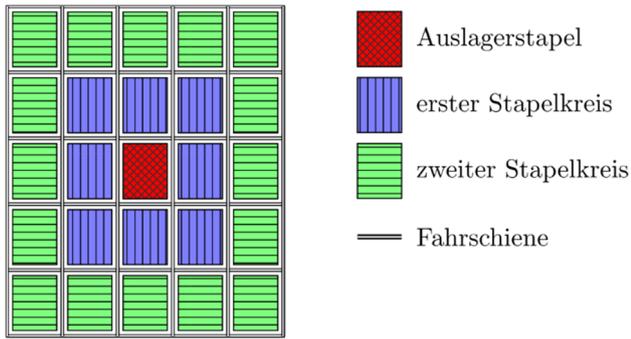


Abbildung 2. Auslagerstapel und freie Stapel

Zunächst wird versucht, den Umlagerbehälter auf einen der ersten acht benachbarten Stapel (blau) umzulagern. Ist dies nicht möglich, werden die nächsten 16 (grün) angefahren. Diese Annahme musste getätigt werden, um die Umlagerfahrzeit mit lediglich einer Formel auszudrücken.

Der erste Term in Gleichung (9) beschreibt die Wahrscheinlichkeit, dass die ersten acht, ringförmig um den betroffenen Stapel lokalisierten Lagerschächte voll besetzt sind. Analog dazu beschreibt der zweite Ausdruck die Wahrscheinlichkeit, in dieser Umlagerregion einen freien Stapel anzutreffen. Gemäß Gleichung (10) ist n dabei das jeweilige Maximum der Laufvariablen:

$$n = \max[i, j] \quad (10)$$

Die gesamte Umlagerzeit ergibt sich, wie in nächststehender Formel (11) ersichtlich, aus der Summe aus der Umlagerfahrzeit (Gleichung (9)) und der Hub- und Senkzeit (Gleichung (7)):

$$t_U = t_{U,F} + t_{HS} \quad (11)$$

4.5 BEDIENZEIT

Sobald der auszulagernde Behälter vom Roboter zum I/O-Schacht transportiert wurde, wird dieser vom Roboter durch den I/O-Schacht zur Kommissionierstation abgesenkt und die Klauen geöffnet. Im Doppelspielbetrieb erfolgt sogleich der Behältertausch durch ein Förderband oder eine Drehvorrichtung, sodass der Roboter den nächsten einzulagernden Behälter aufnehmen kann. Gleichung (12) beschreibt diesen Prozess:

$$t_{IO} = 2 \cdot t_{VE} + 2 \cdot \frac{h_B}{v_y} \cdot sh + t_{BT} \quad (12)$$

Der erste Summand t_{VE} beschreibt das Ver- und Entriegeln der Klauen des Roboters. Wie lange die Hub- und Senkzeit beim Schacht dauert, ist wiederum von der Stapelhöhe abhängig. Der letzte Ausdruck t_{BT} beschreibt die Zeit für den Austausch eines Behälters in der Kommissionierstation durch das Förderband oder den Drehteller.

5 ERGEBNISSE

Kapitel 5 dient einerseits zur Bewertung der Approximationsqualität des analytischen Ansatzes aus Kapitel 4 sowie andererseits zur praxisrelevanten Anwendung des analytischen Modells anhand eines Optimierungsbeispiels.

5.1 VALIDIERUNG

Mittels einer diskreten Ereignissimulation soll der analytische Näherungsansatz validiert werden. Tabelle 1 zeigt die Eingangsparameter für die Simulation. Die geometrischen und kinematischen Daten stammen von einem europäischen Lagersystem-Anbieter.

Tabelle 1. Simulationsparameter

	Parameter	Wert
Geometrie	Δx	0,70 m
	Δz	0,50 m
	f	$\in\{10\%,50\%,75\%,90\%,95\%,98\%\}$
	h_B	0,33 m
	sh	$\in\{1,\dots,25\}$
	n_x	$\in\{10,20,30,40,50\}$
	n_z	$\in\{10,20,30,40,50\}$
Roboter	v	2,00 m/s
	v_y	1,60 m/s
	a	0,80 m/s ²
	t_{RW}	5,00 s
Pick	t_{BT}	1,00 s
	t_{VE}	1,00 s

Das Simulationsmodell wurde mit der DES-Software SIMIO (Version 15) erstellt und stellt ein RCS/RS dar, auf dem ein Roboter Lagereinheiten ein-, aus-, um- und ggf. auch rückumlagern kann. Kommt eine neue Lagereinheit in der Lagervorzone an, wird diese von der Kommissionierstation beim I/O-Schacht bereitgestellt, sodass der Roboter die Lagereinheit auf die Rasterebene heben kann.

Anschließend wird der neue Behälter zum zugewiesenen Stapel transportiert. 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. Ist kein direkter Zugriff möglich, so werden zuvor alle darüber gelagerten Behälter umgelagert. Die auszulagernde Lagereinheit wird durch den Roboter zum I/O-Schacht transportiert.

Der Vergleich der Ergebnisse des analytischen Ansatzes mit jenen der Simulation zeigt eine gute Übereinstimmung. Abbildung 3 stellt den Durchsatz aufgetragen über

der Stapelhöhe für ein RCS/RS mit 625 Stapeln (25 mal 25) und bei einem Füllgrad von 90 % dar.

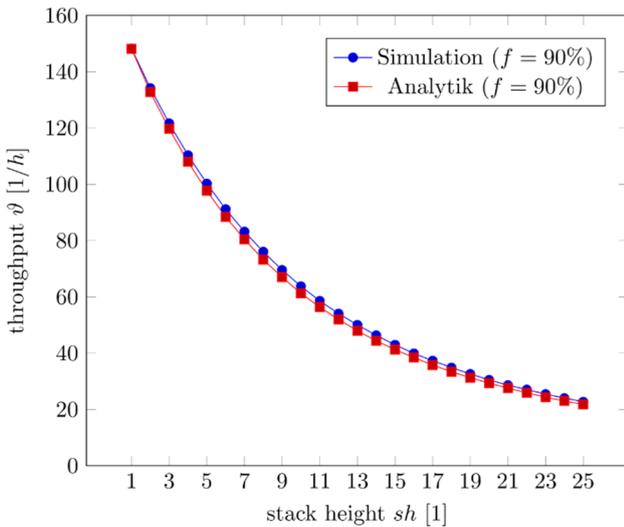


Abbildung 3. Vergleich Analytischer Ansatz - Simulation: Durchsatz eines 25x25 RCS/RS in Abhängigkeit von der Stapelhöhe (Füllgrad $f=90\%$, ohne Rückumlagern)

5.2 OPTIMIERUNGSBEISPIEL

Ziel des Optimierungsbeispiels ist es, verschiedene Varianten eines RCS/RS mit einer Gesamtanzahl von 10,000 Behältern zu betrachten und hinsichtlich Durchsatzes sowie Flächenbedarf zu vergleichen. Dafür wird das folgende erforderliche Parametersetting definiert:

Tabelle 2. erforderliches Parametersetting

Parameter		Wert
Lagerkapazität	N	10,000 (Abweichung +/- 2%)
Stapelhöhe	sh	$\in \{8, \dots, 25\}$
Raster	$n_x = n_z$	$\in \{10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50\}$
Füllgrad	f	90%
Behälterhöhe	h_c	0,33 m

Die Lagerkapazität N darf maximal 2% vom Zielwert abweichen. Der Platzbedarf errechnet sich ausschließlich anhand der Fläche des Lagerblocks. Die Flächen für die Kommissionierstation sowie den I/O-Schacht werden vernachlässigt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 4 dargestellt. Der Durchsatz des RCS/RS mit einem Roboter ist stark von der Kubatur des Lagers abhängig.

Kleine Flächen, erreichbar durch entsprechend hohe Stapelhöhen, lassen keine hohen Umschlagleistungen zu. Dies resultiert aus den zahlreichen Umlagerungsvorgängen sowie den länger dauernden Hub- und Senkzeiten aufgrund der großen Stapelhöhen.

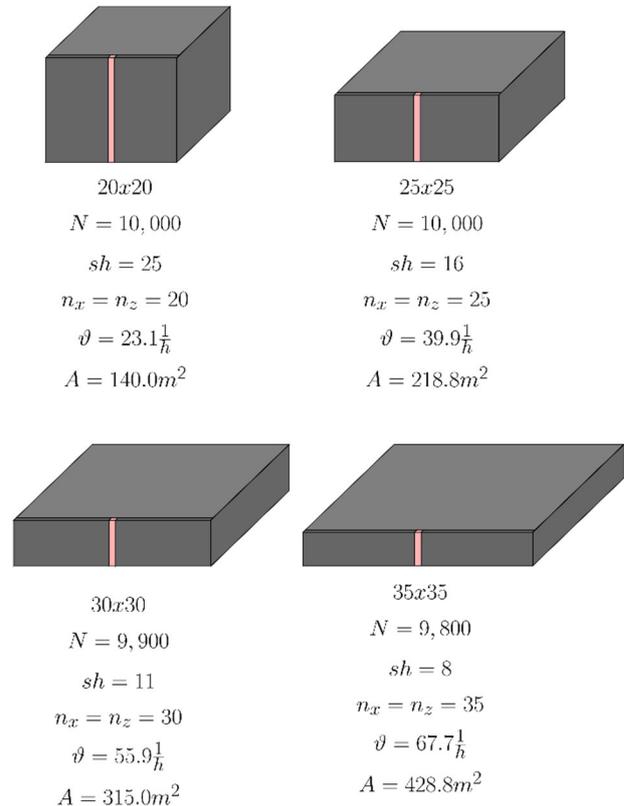


Abbildung 4. Optimierungsbeispiel

6 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Bisher stellen weder Anbieter von RCS/R-Systemen noch die Wissenschaft einfache und schnelle Möglichkeiten bereit, die Umschlagleistung eines RCS/RS mit einem gegebenen Parametersatz zu berechnen. Mit dem vorgestellten Näherungsansatz kann der Durchsatz eines RCS/RS mit einem Roboter hinreichend genau analytisch angenähert werden.

Zahlreiche Parameter können mit diesem Modell variiert werden, wodurch ein breites Feld an Systemen betrachtet werden kann. Im Rahmen des Optimierungsbeispiels wurden für eine gewisse Stellplatzkapazität verschiedene Auslegungsvarianten ausgewertet und der Durchsatz sowie der Flächenbedarf miteinander verglichen. Dabei zeigte sich, dass die Rastergröße und die Stapelhöhe großen Einfluss auf den Durchsatz eines RCS/RS mit einem Roboter haben. Das vorgestellte Spielzeitmodell soll in Zukunft als Grundlage für die Erweiterung der Berechnung auf den Betrieb mehrerer Roboter am Raster dienen. Dazu soll ein warteschlangentheoretischer Ansatz entwickelt werden.

Überdies sollen, basierend auf der nunmehr angewandten gleichverteilten Artikel- und Zugriffsstruktur, Untersuchungen mit einer klassenbasierten Verteilung durchgeführt werden. Dies soll unter anderem den Effekt der Selbstsortierung von Systemen des Anbieters *AutoStore* erklären.

NOMENKLATUR

Δx ...Abstand zweier Stapel in x-Richtung [m]
 Δz ...Abstand zweier Stapel in z-Richtung [m]
 a ...Beschleunigung des Roboters [m/s²]
 f ...Füllgrad [1]
 h_B ...Behälterhöhe [m]
 k_0 ...Position des I/O-Schachts entlang der x-Achse [m]
 n_x ...Anzahl der Stapel entlang der x-Achse [1]
 n_z ...Anzahl der Stapel entlang der z-Achse [1]
 sh ...Stapelhöhe [1]
 t_{BT} ...Behältertauschzeit in der Kommissionierstation [s]
 t_{DS} ...Fahrzeit des Roboters im Doppelspielbetrieb [s]
 t_{ES} ...Fahrzeit des Roboters im Einzelspielbetrieb [s]
 t_{HS} ...Hub- und Senkzeit [s]
 t_{IO} ...Zeit am I/O-Schacht [s]
 t_{RW} ...Zeit für einen Richtungswechsel (Radwechsel) [s]
 $t_{S_{DS}}$...Spielzeit im Doppelspielbetrieb [s]
 $t_{S_{DS_{RU}}}$... Spielzeit im Doppelspielbetrieb mit Rückumlagerungen [s]
 t_U ...Gesamtzeit zum Umlagern [s]
 t_{UF} ...Fahrzeit des Roboters zum Umlagern [s]
 t_{VE} ...Behälter Ver- und Entriegelungszeit [s]
 v ...Geschwindigkeit des Roboters [m/s]
 v_y ...Hub-Senk-Geschwindigkeit des Roboters [m/s]
 w_U ...Umlagerwahrscheinlichkeit [1]

LITERATUR

- [1] M. ten Hompel, T. Schmidt, J. Dregger, Materialflusssysteme, Förder- und Lagertechnik, 4. Auflage, Springer Verlag, Berlin, 2018
- [2] M. ten Hompel, T. Bauernhansl, B. Vogel-Heuser, Handbuch Industrie 4.0, Band 3: Logistik, 3. Auflage, Springer Verlag, Berlin, 2020
- [3] K.-H. Wehking, Technisches Handbuch Logistik 1, Fördertechnik, Materialfluss, Intralogistik, Springer Verlag, Berlin, 2020
- [4] 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
- [5] 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
- [6] 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
- [7] S. Galka, C. Scherbarth, "Simulationsbasierte Untersuchung der Grenzproduktivität von Robotern in einem AutoStore-Lagersystem", Simulation in Produktion und Logistik 2021, Cuvillier Verlag, Göttingen, 2021
- [8] X. Chen, P. Yang, Z. Shao, Simulation-based time-efficient and energy-efficient performance analysis of an overhead robotic compact storage and retrieval system. Simulation Modelling Practice and Theory, 2022
- [9] S. Tjeerdsma, Redesign of the Auto-Store order processing line, A multi-scenario discrete-event simulation study. University of Twente; 2019.
- [10] H. Hameed, A. Rashid, K.A. Amry, Automatic Storage and Retrieval System using the Optimal Path Algorithm. 3D SCEER Conference, 125–133, 2020
- [11] P. Trost, G. Kartnig, M. Eder, Simulation study of RCS/R-systems with several robots serving one picking station, FME Transactions, doi: 10.5937/fme2302201T, 2023
- [12] D. Ko, J.A. Han, A rollout heuristic algorithm for order sequencing in robotic compact storage and retrieval systems. Expert Systems with Applications, doi: 10.1016/j.eswa.2022.117396, 2022
- [13] P. Trost, G. Kartnig, M. Eder, Simulation des Grenzdurchsatzes von Autostore-Systemen, Logistics Journal: Proceedings, 2022
- [14] P. Trost, G. Kartnig, M. Eder, Simulationstudy of Autostore systems, Proceedings of the XXIV International Conference MHCL'22, 2022

- [15] G. Kartnig, P. Trost, M. Eder, RCS/RS under throughput investigation, Proceedings of the 16th International Material Handling Research Colloquium (IMHRC) and the 11th International Scientific Symposium on Logistics (ISSL), Dresden, Saxony, Germany, 2023
- [16] M. Eder, An approach for performance evaluation of SBS/RS with shuttle vehicles serving multiple tiers of multiple-deep storage rack. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, doi: 10.1007/s00170-020-06033-y, 2020
- [17] M. Eder, An approach for performance evaluation of SBS/RS with multiple-deep of multiple-deep storage. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, doi: 10.1007/s00170-019-04831-7, 2020

Dipl.-Ing. Philipp Trost, B.Sc., Research Assistant 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.

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