

Analytischer Berechnungsansatz für die Umschlagsleistung eines RCS/RS mit mehreren Robotern

Analytical performance calculation approach for an RCS/RS with several robots

Philipp Trost
Michael Eder
Simon Schaffer
Georg Kartnig

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

Von oben durch Roboter bediente automatische Behälterkleinteilelager (RCS/RS) bieten neben der hohen Lagerdichte vielerlei weitere Vorteile. Bislang wurden weder einfache noch rasch lösbare analytische Durchsatzberechnungsmodelle entwickelt. Daher sind Kunden und Berater nach wie vor auf die Ergebnisse numerischer Simulationsmodelle der Hersteller angewiesen, ohne zu erfahren, ob das System am optimalen Betriebspunkt betrieben wird. Dieses Paper präsentiert ein zeitkontinuierliches und wegdiskretes Spielzeitmodell und darauf aufbauend ein beschränktes Warteschlangenmodell, mit dem der Durchsatz eines RCS/RS mit mehreren Robotern analytisch berechnet werden kann. Das Modell, das mit einer diskreten Ereignissimulation validiert wird, bietet die Möglichkeit, jede beliebige Artikelzugriffsverteilung zu implementieren.

[Schlüsselwörter: Automatische Lagersysteme, RCS/RS, Spielzeitmodell, Warteschlangentheoretische Ansätze, diskrete Ereignissimulation]

Robot-operated automated container small parts storage (RCS/RS) systems offer numerous advantages. However, until now, neither simple nor quickly solvable analytical throughput calculation models have been developed. As a result, customers, suppliers, and consultants still rely on the results of manufacturers' numerical simulation models without knowing whether the system is operating at an optimal point. This paper presents a time-continuous and path-discrete cycle time model and, based on that, a single-queueing model that allows the throughput of an RCS/RS with multiple robots to be calculated analytically. The model, validated through discrete event simulation, offers the ability to implement any desired item access distribution.

[Keywords: Automated storage systems, RCS/RS, Cycle time model, Queueing theory, Discrete event simulation]

1 EINLEITUNG

Seit Jahren werden in Österreich jeden Tag mindestens zwölf Hektar wertvoller Ackerböden durch Bauprojekte versiegelt. Wie der WWF-Bodenschutzbericht 2023 zeigt, ist der Neubau auf der grünen Wiese nach wie vor die beliebteste Art, um Gewerbe- und Logistikzentren zu errichten. Insgesamt werden somit jährlich Flächen im Ausmaß von 13 Quadratkilometern, was in etwa der Fläche von 1.820 Fußballfeldern entspricht, durch Betriebsflächen verbaut [1]. Die Gründe für die Notwendigkeit von Lagerhaltung und den damit einhergehenden Bau von Logistikzentren sind vielfältig, zumeist jedoch auf den generellen Trend zu E-Commerce und auf die Sicherheitsbestandsbildung zur Krisenabsicherung zurückzuführen.

Die Logistik selbst hat aufgrund des hohen Verkehrsaufkommens, aber auch aufgrund der großen Lager- und Kommissionierzentren, einen besonders hohen ökologischen Fußabdruck [2]. Lagern als logistische Funktion verursacht zwar Kosten, trägt jedoch meist nicht direkt zur Produktivität bei. Automatische Lagersysteme erfreuen sich daher immer größerer Beliebtheit, insbesondere wegen der hohen Umschlagleistung, die sie ermöglichen. Der Platzbedarf für solche Anlagen ist jedoch erheblich und trägt oft maßgeblich zur Gesamtgröße von Logistikzentren bei.

Robotic compact storage and retrieval systems (RCS/RS) zeichnen sich unter anderem durch ihre rasterförmig angeordneten Behälterstapel aus, die eine bis zu viermal höhere Lagerdichte im Vergleich zu klassischen automatischen Lagersystemen ermöglichen, aus. Zudem ermöglichen derartige von oben durch Roboter bediente automatische Behälterkleinteilelager eine hohe Umschlagleistung und bieten aufgrund der Redundanz eine hohe Zuverlässigkeit [3,4].

Obwohl sich RCS/R-Systeme, wie u.a. in Abbildung 1 dargestellt, großer Nachfrage erfreuen, gibt es nach wie vor weder Daten zur erzielbaren Umschlagleistung noch ent-

sprechende Berechnungsansätze. Neben einem nur numerisch lösbaren Ansatz [5] und einem Spielzeitmodell zur Durchsatzbestimmung eines RCS/RS mit einem Roboter [6] existieren weder allgemeine Informationen zur Umschlagsleistung derartiger Systeme noch analytische Ansätze zur Approximation des Durchsatzes. Daher sind sowohl der Vertrieb als auch die Kunden in der Regel weiterhin auf Simulationsmodelle der Hersteller angewiesen. Zudem werden den Kunden weder die konkreten Szenarien der Simulationsergebnisse offengelegt, noch werden die Systeme hinsichtlich entscheidender Parameter wie Durchsatz oder Flächenbedarf optimal ausgelegt [7].

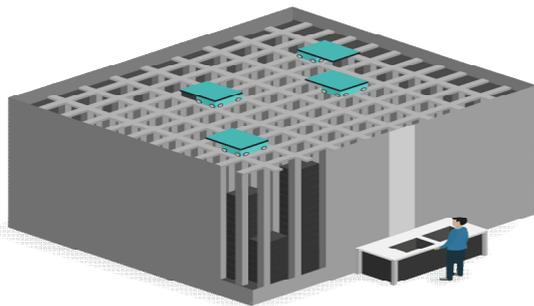


Abbildung 1. Beispiel RCS/RS (Quelle: Motion Miners [8])

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es daher, den Durchsatz eines RCS/R-Systems mit einer Kommissionierstation durch einer analytischen Näherungsberechnung abschätzen zu können. Dazu wird, aufbauend auf einem Spielzeitmodell von Trost et al. [6], ein warteschlangentheoretischer Ansatz zur Durchsatzberechnung entwickelt. Damit soll die Umschlagleistung eines RCS/RS mit mehreren Robotern, die eine Kommissionierstation bedienen, einfach und schnell berechnet werden können. Aus dem eben formulierten Ziel können die folgenden Forschungsfragen abgeleitet werden, die im Rahmen dieses Papers beantwortet werden sollen:

- Wie kann der Durchsatz eines RCS/RS mit mehreren Robotern und einer Kommissionierstation analytisch abgeschätzt werden?
- Wie können die Ergebnisse mittels einer diskreten Ereignissimulation des Systems validiert werden?
- Wie beeinflussen Rückumlagerungen und der damit ggf. einhergehende Selbstsortierungseffekt die Umschlagleistung eines RCS/RS?
- Wie kann ein RCS/RS mit einer Kommissionierstation für ein gegebenes Parametersetting hinsichtlich gewisser Kriterien optimal dimensioniert werden?

Die Relevanz und die Forschungswürdigkeit dieser Forschungsfragen soll unter anderem mit einer umfassenden Literaturrecherche (Kapitel 2) untermauert werden. Überdies wird in Kapitel 3 das zu untersuchende System beschrieben, bevor in Kapitel 4 der analytische Ansatz vorgestellt wird. Dieser wird mit Hilfe einer numerischen Simulation in Kapitel 5 validiert und anschließend wird im

Rahmen eines Optimierungsbeispiels (Kapitel 6) eine praxisnahe Anwendungsmöglichkeit präsentiert.

2 LITERATUR

Obwohl automatische Lagersysteme ein sehr beliebtes Forschungsgebiet sind, und es eine breite Auswahl an Literatur und wissenschaftlichen Publikationen gibt, sind RCS/R-Systeme ein wenig erforschtes Gebiet. Dies kann auf drei grundlegende Aspekte zurückgeführt werden:

1. Hohe Komplexität des Systems und der zugrundeliegenden Prozesse sowie der Steuerung.
2. Strikte Geheimhaltung seitens der Lagerhersteller und Systemanbieter.
3. Bis vor wenigen Jahren gab es am RCS/RS Markt für die beiden etablierten Hersteller wenig Konkurrenz.

In den letzten Jahren nahm die Anzahl der Lagerhersteller, die RCS/R- oder ähnliche Systeme in ihrem Produktportfolio haben, deutlich zu. Neben den beiden großen, *AutoStore* und *Ocado*, sind es viele kleine Hersteller, wie *Volume Dive*, *GridStore* oder *Intellistore*, die mit geringfügigen Adaptierungen oder Verbesserungen Lücken, u.a. auch im Bereich des Patentrechtes, erschlossen haben und Marktnischen bedienen. Gänzlich neu überdacht wurde das System vom großen deutschen Logistiksystemanbieter *Jungheinrich*. Deren *Powercube*-System bedient das Lager von unten und verwendet Roboter mit einer Ladekapazität von zwei Behältern. Der deutsche Lagerlogistikanbieter Gebhardt hat mit dem *Instapick*-System die Vorteile eines Shuttlesystems mit jenen des RCS/RS kombiniert.

Eines haben alle Lagerhersteller gemein: Jedes Lagersystem muss aufwendig simuliert werden, bevor dem Kunden Auskunft über den Durchsatz und weitere kaufrelevante Kennzahlen gegeben werden kann. Gerade der Prozess der Angebotslegung bzw. vor dem Auftrag könnte durch analytische Modelle, die binnen weniger Sekunden Aussagen zu Durchsatz, Flächen- und Energiebedarf sowie Kosten, liefern entscheidend beeinflusst werden. Darüber hinaus muss festgehalten werden, dass es für RCS/RS weder Normen, Richtlinien, Leitfäden oder Empfehlungen gibt, die Kunden oder deren Beratern einen unabhängigen Vergleich ermöglichen.

Aus wissenschaftlicher Sicht gibt es zwei wesentliche Ansätze zur analytischen Durchsatzberechnung: Einer stammt von Zou et al. [5] und der andere von Trost et al. [6].

Zou et al. [5] modellierten ein teiloffenes Warteschlangennetzwerk zur Abschätzung des Durchsatzes. Dies geschah unter der Annahme zahlreicher Vereinfachungen

sowie der Einführung eines „Wandparameters“. Die zentrale Aussage dieser Untersuchung ist, 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. Der vorgestellte Ansatz ist weder einfach anwendbar noch rasch analytisch lösbar.

Trost et al. [6] präsentierten eine andere Möglichkeit zur Durchsatzberechnung für RCS/R-Systeme mit einem Roboter. Mit Hilfe eines probabilistischen Spielzeitmodells kann die Umschlagleistung eines Roboters berechnet werden. Der Ansatz wurde mittels diskreter Ereignissimulation validiert. Der Durchsatz mehrerer eingesetzter Roboter kann durch Extrapolation, wie u.a. auch Kartnig et al. [7] zeigten, einfach abgeschätzt werden.

Trost and Eder [9] ergänzten den Ansatz und entwickelten eine One-Path Umlagerungsstrategie, die, verglichen mit der zirkulären Umlagerungsstrategie, höhere Durchsätze ermöglicht. Der große Vorteil dieses analytischen Ansatzes ist die einfache und rasche Lösbarkeit mit Standard Algebra- oder Tabellenkalkulationsprogrammen.

Neben der analytischen Berechnung ist die diskrete Ereignissimulation ebenso eine beliebte Methode zur Analyse logistischer Systeme. So nutzen Beckschäfer et al. [10], Galka et al. [11], Chen et al. [12], Tjeerdsmas [13], Hameed et al. [14] und Trost et al. [15,16] eine Simulation, um verschiedene Untersuchungen von RCS/R-Systemen durchzuführen. Während Beckschäfer et al. [10] verschiedene Lagerhaltungsstrategien testeten, führten Galka et al. [11] und Trost et al. [15,16] diverse Maximaldurchsatz-Untersuchungen durch. Tjeerdsmas [13] wandte die ereignisdiskrete Simulation auf ein konkretes Problem der holländischen Post an, und Chen et al. [12] untersuchten RCS/R-Systeme mit Brückenkränen anstelle von Robotern.

3 SYSTEMBESCHREIBUNG

Das untersuchte System ist ein vollautomatisches, roboterbedientes, rasterförmig angeordnetes Behälterlager. Abbildung 2 zeigt schematisch den Aufbau und die Komponenten eines RCS/RS.

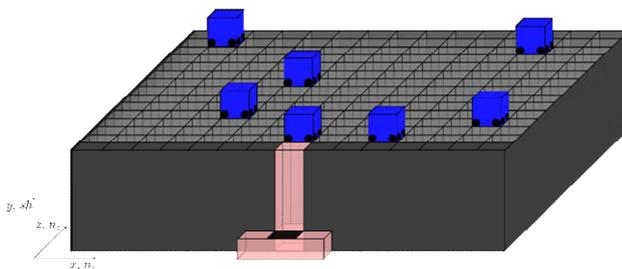


Abbildung 2. Schematische Darstellung eines RCS/RS

Die vier Grundbestandteile sind neben den Behältern die Roboter, der Raster und die Kommissionierstation mit dem I/O-Schacht. Die grundlegenden Prozesse innerhalb eines RCS/RS sind die Einlagerung neuer Artikel, die Auslagerung angeforderter Artikel sowie die dazu ggf. notwendigen Um- und Rückumlagerungen [3,4,7]. Eine detailliertere Beschreibung des Systems sowie sämtlicher Prozesse kann unter anderem in [17] nachgelesen werden. Unterschiede zwischen den einzelnen Herstellern sind in u.a. in [7] detailliert beschrieben.

Die wichtigsten Annahmen, die sowohl in den analytischen Ansatz als auch in die Validierung mittels numerischer Simulation eingehen, werden nachfolgend gelistet:

- Die Roboter arbeiten grundsätzlich im Doppelspielbetrieb.
- Die Aufträge werden gemäß der FCFS-Regel abgearbeitet.
- Der I/O-Schacht ist entlang der Kante parallel zur x-Achse des Rasters angeordnet.
- Für eine maximale Durchsatzbetrachtung wird vorausgesetzt, dass stets Aufträge im System vorhanden sind.
- 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 stets gewährleistet ist.
- Das Routing der Roboter am Raster schließt Kollisionen aus. Im Falle einer Blockade weichen Roboter Hindernissen am Raster aus.
- Eine Warteschlange kann sich auf den Rasterelementen unmittelbar vor bzw. neben dem I/O-Schacht bilden. Lediglich die Abfahrtsmöglichkeit der abgefertigten Roboter muss gewährleistet sein.
- Die Behälter sind gleichverteilt über alle Stapelhöhen eingelagert, und es wird eine gleichverteilte Zugriffswahrscheinlichkeit angenommen. Sofern eine andere Wahrscheinlichkeitsverteilung zu Testzwecken, u.a. zur Untersuchung des ggf. vorhandenen Selbstsortierungseffektes, implementiert wird, wird dies ausdrücklich entsprechend gekennzeichnet und beschrieben.

Zur Untersuchung des Selbstsortierungseffektes wird der absolute Sortierungsgrad des Lagersystems ausgewertet. Dieser ist definiert als das Verhältnis der „richtig gelagerten“ Behälter zur Anzahl aller Behälter. Betrachtet man

beispielsweise zwei Klassen, A und B, eine maximale Stapelhöhe von zehn Behältern und eine Aufteilung von 8 B-Behältern unten und 2 A-Behältern oben, so entspricht dies einem Sortierungsgrad von 100%. Jede Abweichung davon, sei es nur ein fehlender A-Behälter, führt zu einer Reduktion des Sortierungsgrades gemäß obiger Definition. Die Zugriffswahrscheinlichkeit innerhalb der jeweiligen Klassen ist gleichverteilt.

4 ANALYTISCHER ANSATZ

Für den analytischen Ansatz zur Durchsatzberechnung eines RCS/R-Systems mit mehreren Fahrzeugen wird die Spielzeit der Roboter mittels der Warteschlangentheorie (aufbauend auf [6]) kombiniert, wodurch die Ankunftszeit der Fahrzeuge am I/O-Schacht mit der Bedienzeit gekoppelt wird. Der Ansatz setzt sich folgendermaßen zusammen:

- Spielzeit eines Roboters (Zwischenankunftszeit)
 - Fahrzeit
 - Ein- und Auslagerzeit
 - Umlagerzeit
- Zeit am I/O-Schacht (Bedienzeit)
- Warteschlangenmodell M|M|1|K

Für die Wegzeitberechnung muss eine Unterscheidung vorgenommen werden: Ist der Fahrweg ausreichend lange, so erreicht der Roboter seine maximale Geschwindigkeit und kann bis zum Beginn des Bremsvorganges mit konstanter Geschwindigkeit am Raster fahren (Trapezfahrt). Sofern der Roboter seine maximale Geschwindigkeit nicht erreicht, spricht man von einer Dreiecksfahrt, da der Roboter so lange beschleunigt, bis wieder gebremst werden muss, um am Ziel zu stehen zu kommen. Abbildung 3 soll dies verdeutlichen:

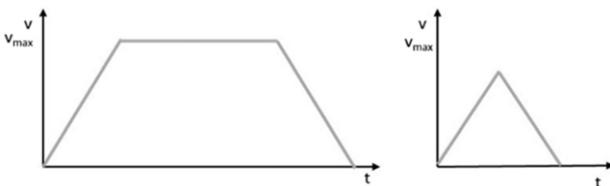


Abbildung 3. Trapez- (links) und Dreiecksfahrt (rechts)

Erreicht der Roboter die maximale Geschwindigkeit nicht, also $xz < \frac{v_R^2}{a_R}$, so spricht man von einer Dreiecksfahrt und es gilt (Gleichung (1)):

$$t(xz) = 2 \cdot \sqrt{\frac{xz}{a_R}} \quad (1)$$

Erreicht der Roboter die maximale Geschwindigkeit (Trapezfahrt), so gilt Gleichung (2):

$$t(xz) = \frac{xz}{v_R} + \frac{v_R}{a_R} \quad (2)$$

Analog dazu kann die zeitliche Dauer eines Hub- oder Senkvoranges aufgeteilt werden (Gleichungen (3) und (4)).

Für $y < \frac{v_T^2}{a_T}$ gilt:

$$g(y) = 2 \cdot \sqrt{\frac{y}{a_T}} \quad (3)$$

Andernfalls gilt:

$$g(y) = \frac{y}{v_T} + \frac{v_T}{a_T} \quad (4)$$

4.1 SPIELZEIT EINES ROBOTERS

Das Spielzeitmodell basiert auf [6] und wurde entsprechend adaptiert, wodurch auch die Position des I/O-Schachtes variabel entlang einer Kante des Rasters gewählt werden kann. Die Spielzeit im Doppelspielbetrieb ohne Rückumlagerungen lässt sich mit Gleichung (5) berechnen:

$$t_{A,DS} = 2 \cdot t_{ES} + t_{DS} + 2 \cdot t_{HS} + w_U \cdot t_U + t_{IO} \quad (5)$$

Werden Rückumlagerungen durchgeführt, wodurch sich bei sehr inhomogenen Zugriffverteilungen (z.B. ABC) eine Selbstsortierung ergeben kann, so wird die Spielzeit eines Roboters mit Gleichung (6) berechnet:

$$t_{A,DS,RU} = 2 \cdot (t_{ES} + t_{DS} + 2 \cdot t_{HS} + w_U \cdot t_U) + t_{IO} \quad (6)$$

4.1.1 FAHRZEITEN

Analog zu [6] errechnet sich die Fahrzeit für eine Ein- oder Auslagerung in einem Einzelspiel aus den Fahrtanteilen des Roboters in x- und z-Richtung sowie der Radwechselzeit im Falle eines Richtungswechsels (Gleichung (7)).

$$t_{ES} = \frac{1}{n_x} \cdot \frac{1}{n_z} \cdot \sum_{k=1}^{n_x} \sum_{l=1}^{n_z} t(l \cdot \Delta z) + t((|k - k_0|) \cdot \Delta x) + t_{RW} \cdot \text{sign}(|k - k_0|) \quad (7)$$

Ebenso errechnet sich der Fahrzeitanteil im Falle eines Doppelspiels [6] gemäß Gleichung (8):

Die Zwischenankunftszeit t_A entspricht dabei dem Erwartungswert der Spielzeit eines Roboters (Gleichung (5) oder (6)) und ist u.a. davon abhängig, ob Rückumlagerungen stattfinden oder nicht.

Die Bedienrate (Gleichung (12)) der Roboter ist der Kehrwert aus der Bedienzeit (Gleichung (10)):

$$\mu = \frac{1}{t_{IO}} \quad (12)$$

Die Auslastung der Kommissionierstation bzw. des I/O-Schachts kann durch das Verhältnis aus ankommenden und bedienten Robotern pro Zeiteinheit (Gleichung (13)) gebildet werden:

$$\rho = \frac{t_S}{t_A} = \frac{\lambda}{\mu} \quad (13)$$

Sowohl der Ankunfts-, als auch der Bedienprozess weisen Markov-Charakteristik, also Gedächtnislosigkeit, auf. Das bedeutet, dass der aktuelle Zustand nicht von den vorherigen Zuständen beeinflusst wird. Die begrenzte Benutzerpopulation des Systems (Fahrzeuganzahl) folgt aus der endlichen Anzahl an eingesetzten Robotern. Somit ist $K = n_R + 1$. Gleichung (14) liefert die Wahrscheinlichkeit ein leeres System vorzufinden:

$$p_0 = \frac{1 - \rho}{1 - \rho^{K+1}} \quad (14)$$

Die Umschlagleistung des Systems lässt sich anhand von nachfolgender Gleichung (15) berechnen:

$$\vartheta = \mu \cdot (1 - p_0) \quad (15)$$

5 VALIDIERUNG UND AUSWERTUNGEN

Um die Qualität des analytischen Ansatzes aus Kapitel 4 zu bestimmen, wird in Kapitel 5 zunächst eine Validierung mittels numerischer Simulation vorgenommen. Anschließend wird in Kapitel 6 anhand eines Optimierungsbeispiels gezeigt, wie eine praxisrelevante Anwendung des analytischen Ansatzes aussehen kann.

Zur Validierung des analytischen Modells wurde eine diskrete Ereignissimulation erstellt. Mit der Simulationssoftware *SIMIO* (Version 15) wurde ein Modell eines RCS/RS nachgebildet, das aus den in Kapitel 3 beschriebenen Komponenten besteht und die, für die Untersuchung wesentlichen, Prozesse eines RCS/RS durchführen kann. Im Modell können ein oder mehrere Roboter eine Kommissionierstation mit I/O-Schacht beliefern. 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	75%-95%
	h_B	220 mm
	sh	1-25
	n_x	$\in\{10,20,30,40,50\}$
	n_z	$\in\{10,20,30,40,50\}$
Roboter	v_R	4,00 m/s
	v_T	2,50 m/s
	a_R	1,40 m/s ²
	a_T	2,50 m/s ²
	t_{RW}	1,00 s
Pick	t_{BT}	7,00 s
	t_{VE}	1,00 s

Kommt eine neue Lagereinheit in der Lagervorzone an, wird diese von der Kommissionierstation beim I/O-Schacht bereitgestellt, sodass ein zugewiesener Roboter die Lagereinheit auf die Rasterebene heben und anschließend den Behälter zum zugewiesenen Stapel transportieren kann. Die Auswahl des Lagerplatzes erfolgt zufällig. Der beauftragte Roboter senkt 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 im Simulationsmodell zufällig generiert. Ist kein direkter Zugriff möglich, so werden zuvor alle darüber gelagerten Behälter umgelagert. Die auszulagernde Lagereinheit wird durch einen freien Roboter zum I/O-Schacht transportiert.

Hauptzweck der Simulation ist der Vergleich der Ergebnisse des analytischen Modells mit jenen der numerischen Simulation. Abbildung 4 zeigt den Durchsatz in Abhängigkeit von der Anzahl an eingesetzten Robotern eines RCS/R-Systems, die eine Kommissionierstation mit I/O-Schacht beliefern. Dabei sind verschiedene Stapelhöhen zwischen 1 und 25 ausgewertet worden. Die Auswertung wurde bei einer Rastergröße von 50 mal 20 Behälterstapeln, einem Gesamtfüllgrad des Lagers von 90% und einer gleichverteilten Zugriffswahrscheinlichkeit über die Stapelhöhe durchgeführt. Für die Berechnung der Spielzeit wurde Gleichung (5) ohne Rückumlagerungen verwendet.

Die Kurven enden bei jener Roboteranzahl, die nur noch eine minimale Veränderung des Durchsatzes bewirkt. In weiterer Folge wird hierbei auch von der optimalen Roboteranzahl gesprochen.

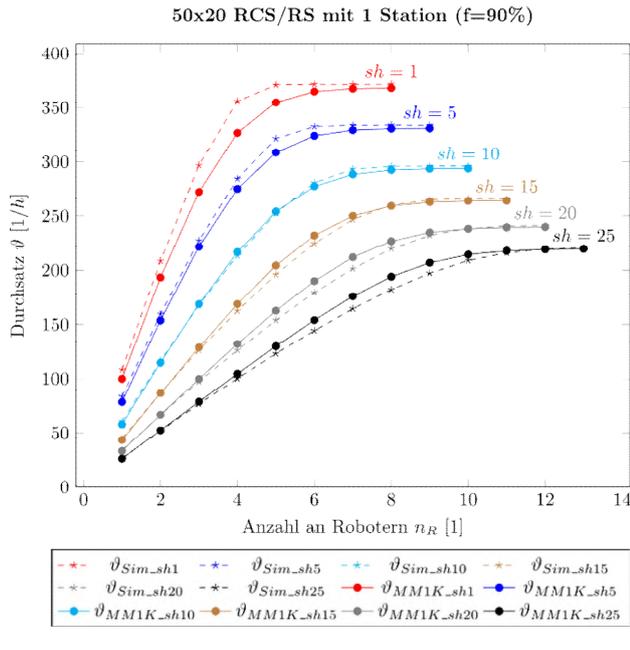


Abbildung 5. Durchsatz in Abhängigkeit der Anzahl an Robotern für verschiedene Stapelhöhen (Vergleich Simulation vs. analytischer Ansatz)

Wie in Abbildung 5 ersichtlich, konnte mit dem M|M|1|K-Modell ein hinreichend genaues Modell zur Durchsatzbestimmung für RCS/RS mit mehreren Robotern und einer Kommissionierstation gefunden werden. Der Vergleich liefert einen maximalen relativen Fehler von weniger als sieben Prozent. Während die Analytik die Simulationsergebnisse für niedrige Stapelhöhen geringfügig unterschätzt, was auf die Einflüsse der Gedächtnislosigkeit der Markov-Prozesse zurückzuführen ist, ergibt sich für größere Stapelhöhen eine Umkehr dieses Effektes. Dies kann durch die häufig notwendigen Umlagerungsvorgänge und das damit einhergehende Verkehrsaufkommen der Roboter am Raster erklärt werden, wodurch die Simulationslogik und die zugrundeliegenden Prozesse Umwege abweichend von der idealen Fahrtroute wählen muss. Dadurch erhöht sich die Anzahl an notwendigen Richtungswechseln, was jeweils mit einer gewissen Totzeit in Form einer Radwechselzeit verbunden ist.

Wichtige Anschaffungsgründe für RCS/R-Systeme sind die hohe Lagerdichte und der oftmals beworbene Selbstsortierungseffekt. Dessen Vorhandensein und die daraus resultierende Auswirkung auf die Umschlagleistung sollen in weiterer Folge im Fokus stehen. In diesem Zusammenhang soll auch die Durchführung von Rückumlagerungen untersucht werden. Dazu wird nun anstatt der Gleichverteilung über die Stapelhöhe eine Pareto-verteilte Zugriffswahrscheinlichkeit implementiert. Abbildung 6 zeigt die Umschlagleistung in Abhängigkeit von der Fahrzeuganzahl für verschiedene Zugriffswahrscheinlichkeiten und eine Rastergröße von 50 mal 20 Stapeln mit einer Stapelhöhe von 20 Behältern. Die Auswertungen wurden, ausgenommen die schwarzen Kurven, zur Gänze mit Rückumlagerungen (Gleichung (6)) durchgeführt.

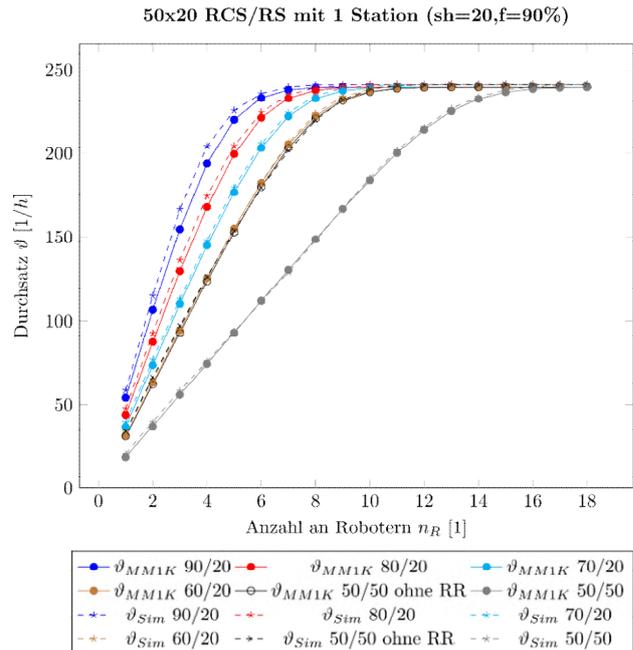


Abbildung 6. Durchsatz in Abhängigkeit der Anzahl an Robotern für verschiedene Zugriffswahrscheinlichkeiten (Vergleich Simulation vs. analytischer Ansatz)

Wie in Abbildung 6 zu erkennen ist, erreicht eine 90-prozentige Zugriffswahrscheinlichkeit auf den obersten vier Behältern die größten Durchsätze. Dies gilt, solange die maximale Auslastung der Kommissionierstation nicht erreicht ist. Je niedriger die Wahrscheinlichkeit ist, einen Behälter auf den obersten vier Ebenen des Lagersystems anzutreffen, desto niedriger ist der Durchsatz und desto flacher ist der Anstieg der Kurve.

Daraus ergibt sich die Frage, ab wann Rückumlagerungen aufgrund des Aufwandes nicht mehr sinnvoll sind. Abbildung 6 zeigt, dass die schwarzen (gleichverteilte Zugriffe über alle Ebenen und keine Rückumlagerungen) und die braunen Kurven (60% der Zugriffe auf den obersten vier Ebenen und Rückumlagerungen) nahezu deckungsgleich übereinander liegen. Folglich kann man dies als praxisrelevante Grenze für Rückumlagerungen festlegen.

Allgemein zeigt Vergleich der Simulationsergebnisse mit jenen der Analytik zeigt wiederum sehr gute Übereinstimmungen. Der absolute Fehler ist stets kleiner als 10% und zumeist im niedrigen einstelligen Prozentbereich.

Abbildung 7 präsentiert die entsprechenden Umlagerungswahrscheinlichkeiten sowie den Gini-Koeffizienten, der die Ungleichheit der Zugriffswahrscheinlichkeiten von Abbildung 6 darstellt. Es zeigt sich, dass die Wahrscheinlichkeit einer Umlagerung indirekt proportional zum Gini-Koeffizienten ist. Überdies wird der Durchsatz eines Roboters abgebildet, wodurch näherungsweise eine Proportionalität des Gini-Koeffizienten zur Umschlagleistung gezeigt werden kann. In Anlehnung an Abbildung 6 ist für den Fall der Gleichverteilung (50/50) sowohl die Umschlagleistung

mit (strichlierte Kurve) als auch ohne Rückumlagerungen dargestellt.

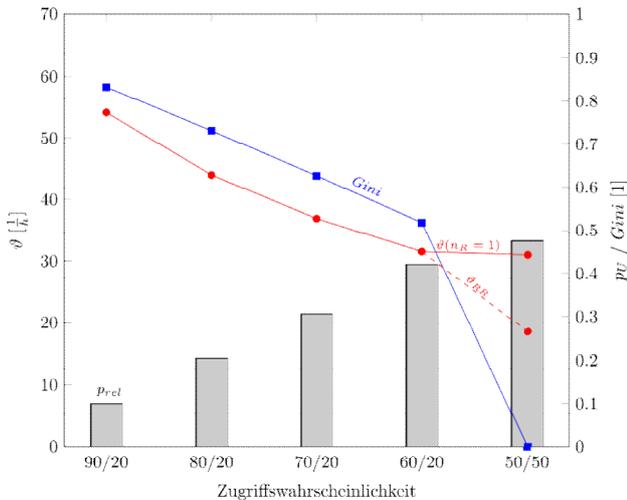


Abbildung 7. Durchsatz eines Roboters (50×20 , $sh=20$), Gini-Koeffizient und Umlagerwahrscheinlichkeit in Abhängigkeit der Zugriffswahrscheinlichkeit

Aufbauend darauf soll die Frage eines möglichen Selbstsortierungseffektes im Falle von Rückumlagerungen geklärt werden. Dazu werden verschiedene Zugriffswahrscheinlichkeit auf den ersten vier Ebenen gewählt (80/20) und der absolute Sortierungsgrad des RCS/R-Systems zu Beginn und nach 10.000 Auslagerungen (Steady State) ausgewertet. Weiters wird die Wahrscheinlichkeit einer Umlagerung jeweils zu Beginn und im eingeschwungenen Zustand ausgewertet. Dies wurde für verschiedene Klassenanzahlen durchgeführt. Abbildung 8 zeigt die Ergebnisse der Auswertung:

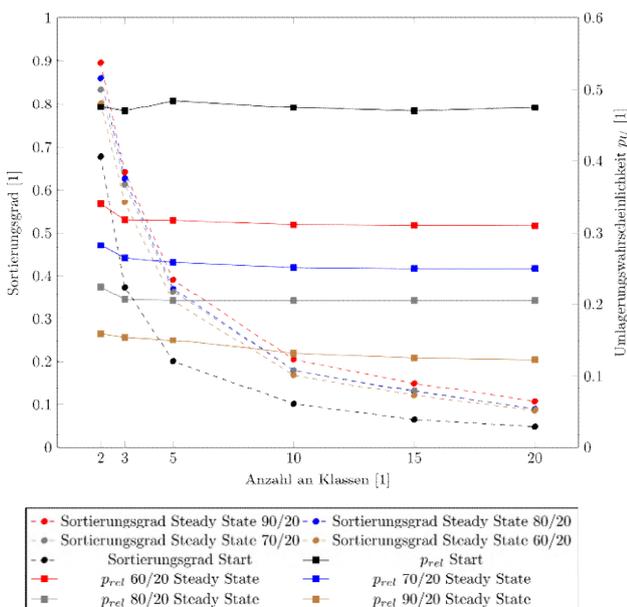


Abbildung 8. Sortierungsgrad und Umlagerungswahrscheinlichkeit in Abhängigkeit von der Anzahl an Klassen

Wie in Abbildung 8 ersichtlich, reduziert sich die Umlagerungswahrscheinlichkeit, unabhängig von der Anzahl an Klassen, während der transienten Phase. Je inhomogener die Verteilung der Zugriffe, desto stärker äußert sich dieser Effekt.

Im eingeschwungenen Zustand ist der Sortierungsgrad (strichlierte Linien) ungefähr doppelt so hoch wie zu Beginn der Simulationsläufe. Mit steigender Klassenanzahl sinkt der Sortierungsgrad. Speziell für eine große Klassenanzahl (ca. ab zehn Klassen) ist der Sortierungsgrad aufgrund der zu kurzen Laufzeit bzw. Gesamtanzahl an Auslagerungen wenig aussagekräftig. Es wird angenommen, dass dieser im Laufe der Zeit weiter steigen würde; brauchbare Ergebnisse dazu sind erst ab mehreren Millionen Auslagerungen zu erwarten.

Insgesamt kann festgehalten werden, dass der Selbstsortierungseffekt im Falle einer 80/20 Verteilung klar erkennbar auftritt, da sich die Anzahl der Umlagerungen im Laufe der Zeit um mehr als die Hälfte reduziert. Wie sehr sich der Selbstsortierungseffekt mit sinkender Ungleichheit der Verteilung verhält (sinkender Gini-Koeffizient), soll mit Hilfe der für zwei und drei Klassen dargestellten, anderen Verteilungen gezeigt werden. Je geringer die Ungleichheit der Verteilung wird, desto weniger Einfluss hat der Selbstsortierungseffekt auf die Anzahl der nötigen Umlagerungen und folglich auf den Durchsatz. Dies bestätigt somit auch die Erkenntnis von Abbildung 6, wonach der positive Effekt durch Rückumlagerungen bei einer 60-prozentigen Zugriffswahrscheinlichkeit im Vergleich mit der Gleichverteilung und dem Verzicht auf Rückumlagerungen nicht mehr erkennbar ist.

6 OPTIMIERUNGSBEISPIEL

Um eine praxisnahe Anwendung des analytischen Ansatzes zu zeigen, soll nun ein Optimierungsbeispiel durchgeführt werden. Das Ziel ist, für ein gegebenes Problem die optimale Ausführung eines RCS/RS hinsichtlich des Durchsatzes und des Flächenbedarfes zu ermitteln. Die wichtigste Eingangsgröße ist die erforderliche Lagerkapazität gemäß Tabelle 2.

Tabelle 2. Eingangsdaten für das Optimierungsbeispiel

Parameter	Wert	
Lagerkapazität	N	25,000 (Abweichung +/- 2%)
Stapelhöhe	sh	$\in \{10, \dots, 25\}$
Raster	n_x, n_z	$\in \{10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50\}$
Füllgrad	f	90%
Behälterhöhe	h_B	220 mm

Die Lagerkapazität N darf um maximal 1% vom Zielwert abweichen. Der Platzbedarf errechnet sich ausschließlich anhand der Fläche des Lagerblocks plus einer zwei Meter breiten Lagervorfläche entlang jener Kante, an der die Kommissionierstation positioniert ist. Sonstige Flächen werden vernachlässigt. Der Raumbedarf (Volumen) ergibt sich aus der Kubatur des Lagers plus einem darüberliegenden, zwei Meter hohen Freiraum für die Roboter sowie dem Volumenbedarf für die zwei Meter breite Lagervorzone. Abbildung 9 zeigt einige ausgewählte Ergebnisse des Optimierungsbeispiels.

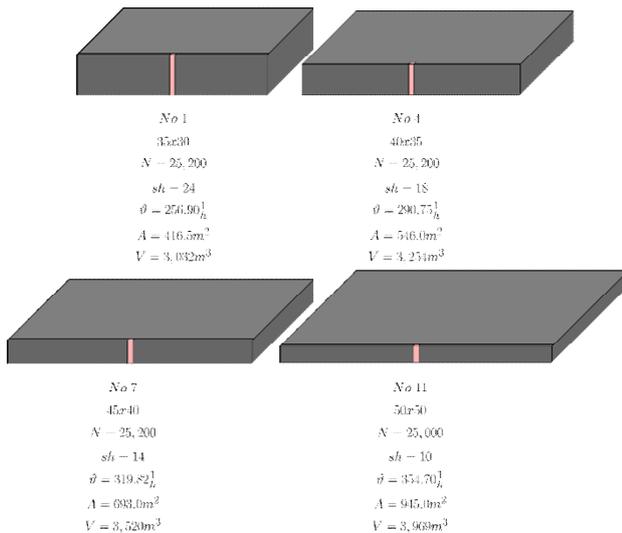


Abbildung 9. Einige Ergebnisse des Optimierungsbeispiels

Hinsichtlich des Durchsatzes schafft das 50 mal 50 große System (Abbildung 9 unten rechts) mit einer Stapelhöhe von zehn Behältern mit knapp 355 Behältern pro Stunde den größten Durchsatz. Allerdings hat dieses System auch den größten Flächen- und Raumbedarf. Dem gegenüber steht Szenario 1, in Abbildung 9 oben links dargestellt, mit einem Flächenbedarf von lediglich der Hälfte und einem um ein Viertel geringeren Volumenbedarf. Aufgrund der wesentlich höheren Stapelhöhe reduziert sich der mögliche Durchsatz auf rund 257 Behälter pro Stunde.

No	n_x	n_z	sh	θ [1/h]	n_R	K [M€]	A [m ²]	V [m ³]
1	35	30	24	256.9	8	1.606	416.5	3032
2	40	25	25	252.0	8	1.595	406.0	3045
3	40	30	21	272.8	8	1.606	476.0	3151
4	40	35	18	290.8	8	1.606	546.0	3254
5	45	25	22	267.3	8	1.582	456.8	3124
6	45	35	16	305.0	9	1.631	614.3	3391
7	45	40	14	319.8	9	1.631	693.0	3520
8	50	20	25	251.8	8	1.595	420.0	3150
9	50	25	20	278.4	8	1.595	507.5	3248
10	50	45	11	344.7	9	1.607	857.5	3790
11	50	50	10	354.7	10	1.645	945.0	3969

Tabelle 3. Ergebnisse des Optimierungsbeispiels

Die Szenarien Nummer 4 (oben rechts) und 7 (unten links) könnten als guter Kompromiss gesehen werden. Hinsichtlich der Kosten beträgt die Differenz zwischen dem billigsten und dem teuersten Szenario rund 70.000,- EUR. Wie Tabelle 3 und Abbildung 9 zeigen, ist die Wahl des optimalen Systems aufgrund der verschiedenen Optionen bereits bei diesem kleinen Beispiel schwierig. Daher soll eine vierstufige Bewertung hinsichtlich der Kriterien Durchsatz, Kosten, Flächen- und Raumbedarf durchgeführt werden. Die Kapazität war in diesem Beispiel eine Eingangsgröße. Alle elf Szenarien werden hinsichtlich der vier Kriterien bewertet. Abschließend werden die Ergebnisse je System summiert und in Form eines Netzdiagramms (Abbildung 10) dargestellt:

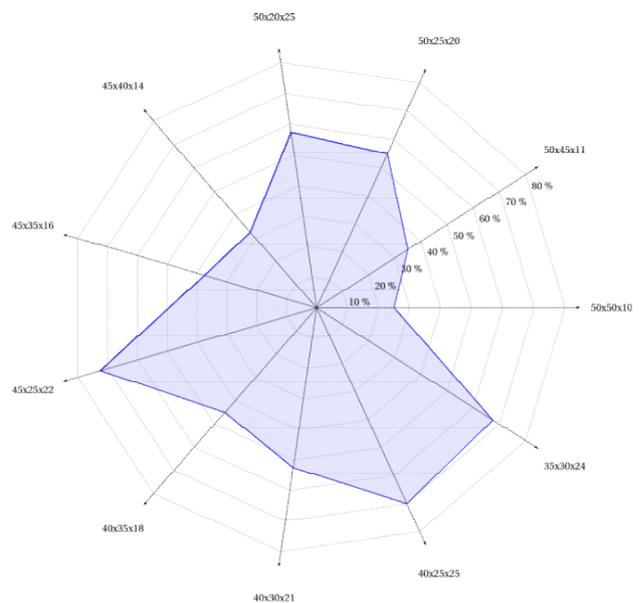


Abbildung 10. Bewertungsdiagramm der elf Szenarien

Wie Abbildung 10 veranschaulicht, wurde das 45x25 große System mit einer Stapelhöhe von 22 Behältern (Szenario 5) am besten bewertet. Unmittelbar danach folgen die Szenarien 1 und 2. Vergleichsweise niedrig wurde die flächenmäßig größte Anlage mit einem 50 mal 50 großen Raster mit Stapelhöhe 10 bewertet.

7 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Aufgrund des unaufhaltbaren Trends zu E-Commerce und den damit einhergehenden Entwicklungen im Bereich der automatisierten Lagersysteme ist es unabdingbar sowohl für Kunden, Anbieter und Berater, als auch für die Hersteller selbst, analytische Modelle zur einfachen und raschen Durchsatzbestimmung zur Verfügung zu haben.

Der in diesem Paper vorgestellte Ansatz zur analytischen Berechnung der Umschlagleistung eines RCS/RS mit einer Kommissionierstation basiert auf einem probabi-

listischen Spielzeitmodell und wurde um ein Warteschlangenmodell erweitert, sodass der Warteprozess der Roboter an der Kommissionierstation berücksichtigt wird.

Der Ansatz wurde mittels diskreter Ereignissimulation validiert. Anschließend wurde anhand eines Optimierungsbeispiels ein praxisnaher Anwendungsfall präsentiert. Die wesentliche Erkenntnis ist, dass der Einfluss der Rückumlagerungen in großem Maße von der Zugriffswahrscheinlichkeit abhängt. Je homogener die Verteilung, desto weniger Einfluss hat die Durchführung von Rückumlagerungen auf den Durchsatz. Dasselbe gilt für den Selbstsortierungseffekt. Dieser tritt umso deutlicher auf, je inhomogener die Verteilung der Zugriffe ist.

Abschließend soll ein Ausblick auf weitere, zukünftige Untersuchungen gegeben werden. Der analytische Ansatz soll in Zukunft derartig erweitert werden, dass mehrere Kommissionierstationen entlang des Rasters berücksichtigt werden können. Überdies sollen verschiedene Betriebsstrategien getestet und miteinander verglichen werden. Weiters sollen Effekte einer Sequenzierung und die Einflüsse wechselnder Bedarfe auf die Selbstsortierung untersucht werden. Der Selbstsortierungseffekt soll weiter erforscht und Eingang in das analytische Modell finden. Ein Vergleich verschiedener RCS/R-Systeme soll die häufig gewünschte Vergleichbarkeit der Lagersysteme bringen.

NOMENKLATUR

Δx ...	Abstand zweier Stapel in x-Richtung [m]
Δz ...	Abstand zweier Stapel in z-Richtung [m]
ϑ ...	Umschlagleistung [1/h]
λ ...	Ankunftsrate der Roboter [1/s]
μ ...	Bedienrate der Roboter [1/s]
ρ ...	Auslastung der Bedienstation [1]
a_R ...	Beschleunigung des Roboters [m/s ²]
a_T ...	Hub-Senk-Beschleunigung [m/s ²]
f ...	Füllgrad [1]
h_B ...	Behälterhöhe [m]
k_0 ...	Position des I/O-Schachts entlang der x-Achse [m]
K ...	Kapazität des Wartesystems [1]
n_R ...	Anzahl der eingesetzten Roboter [1]
n_x ...	Anzahl der Stapel entlang der x-Achse [1]
n_z ...	Anzahl der Stapel entlang der z-Achse [1]

p_0 ...	Wahrscheinlichkeit eines leeren Systems [1]
p_U ...	Wahrscheinlichkeit einer Umlagerung [1]
sh ...	Stapelhöhe [1]
t_A ...	Erwartungswert der Ankunftszeit der Roboter [s]
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_U ...	Gesamtzeit zum Umlagern [s]
t_{UF} ...	Fahrzeit des Roboters zum Umlagern [s]
t_{VE} ...	Behälter Ver- und Entriegelungszeit [s]
v_R ...	Geschwindigkeit des Roboters [m/s]
v_T ...	Hub-Senk-Geschwindigkeit [m/s]
w_U ...	Anzahl an Umlagerungen je Auslagerung [1]

LITERATUR

- [1] WWF, „WWF: Bodenverbrauch 2022 auf 12 Hektar pro Tag gestiegen“, Bodenbericht 2023, 06.06.2023 [Online], <https://www.wwf.at/wwf-bodenverbrauch-2022-auf-12-hektar-pro-tag-gestiegen/>, [zugegriffen am 12.06.2024]
- [2] Umweltbundesamt, „Emissionsquellen“, 05.07.2021 [Online], <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/treibhausgas-emissionen/emissionsquellen#energie-verkehr>, [zugegriffen am 13.06.2024]
- [3] M. ten Hompel, T. Bauernhansl, B. Vogel-Heuser, Handbuch Industrie 4.0, Band 3: Logistik, 3. Auflage, Springer Verlag, Berlin, 2020
- [4] K.-H. Wehking, Technisches Handbuch Logistik 1, Fördertechnik, Materialfluss, Intralogistik, Springer Verlag, Berlin, 2020
- [5] 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

- [6] P. Trost, M. Eder, and G. Kartnig, "RCS/RS mit einem Roboter-Analytische Betrachtung des Durchsatzes." *Logistics Journal: referierte Veröffentlichungen* 2023.
- [7] 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
- [8] Motion Miners, Gridstore Robotics GmbH, [Online] <https://mpi.motionminers.com/de/supporters/gridstore-robotics-gmbh-anbieter>, [zugegriffen am 13.06.2024]
- [9] P. Trost and M. Eder, An analytical performance approach for RCS/RS with one robot serving multiple stack heights under a one-path relocation strategy. *Scientific Reports*, 2024
- [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] S. Galka, C. Scherbarth, "Simulationsbasierte Untersuchung der Grenzproduktivität von Robotern in einem AutoStore-Lagersystem", *Simulation in Produktion und Logistik 2021*, Cuvillier Verlag, Göttingen, 2021
- [12] 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
- [13] S. Tjeerdsma, Redesign of the Auto-Store order processing line, A multi-scenario discrete-event simulation study. University of Twente; 2019.
- [14] H. Hameed, A. Rashid, K.A. Amry, Automatic Storage and Retrieval System using the Optimal Path Algorithm. 3D SCEER Conference, 125–133, 2020
- [15] P. Trost, G. Kartnig, M. Eder, Simulation des Grenzdurchsatzes von Autostore-Systemen, *Logistics Journal: Proceedings*, 2022
- [16] P. Trost, G. Kartnig, M. Eder, Simulationstudy of Autostore systems, Proceedings of the XXIV International Conference MHCL'22, 2022
- [17] 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
- [18] T. Lienert and J. Fottner, No More Deadlocks - Applying The Time Window Routing Method To Shuttle Systems, *ECMS*, 2017
- [19] M. Eder, An analytical approach for a performance calculation of shuttle-based storage and retrieval systems. *Production & Manufacturing Research*, 2019

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

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

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

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

Adresse: 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, E-Mail: philipp.trost@tuwien.ac.at