

# **Simulationsbasierte Untersuchung der Grenzproduktivität von Robotern in einem AutoStore-Lagersystem**

## ***Simulation-based analysis of the marginal productivity of robots in an AutoStore storage system.***

Stefan Galka, OTH Regensburg, Regensburg (Germany),  
stefan.galka@oth-regensburg.de

Christoph Scherbarth, ehem. OTH Regensburg, Regensburg (Germany),  
cscherbarth@gmx.de

**Abstract:** AutoStore is a storage system for automated warehousing of small parts with low space requirements and picking according to the “goods-to-person” principle. The performance of the system depends on factors such as the number of robots and ports as well as the order structure. Due to the numerous interactions, the influence of the individual factors on the system performance can only be investigated using simulation studies. In this paper, the effects of selected factors on the system performance are investigated using a discrete-event simulation model. At the beginning of the paper, the system elements and processes are described. Afterwards, the correlation between the elements and the simulation model will be explained more in detail. Finally, the results of the simulation study are discussed.

## **1 Einführung**

Die Firma Hatteland aus Norwegen entwickelte in den 90-er Jahren des letzten Jahrhunderts ein neues Lagersystem, um es im eigenen Unternehmen einzusetzen. Regale und Gassen wurden im Lager eliminiert und stattdessen die Ladungsträger aufeinandergestellt. Die automatisierte Ein- und Auslagerung übernahmen kleine Roboter. Inzwischen wird das AutoStore-System am Markt angeboten und verzeichnete in den letzten Jahren eine wachsende Beliebtheit. Bisher wurden weltweit mehr als 500 Systeme realisiert (Handling.de 2020). In einer Umfrage unter AutoStore-Nutzern wurden die vergleichsweise hohe Lagerdichte und die einfache Skalierbarkeit des Systems als Vorteile hervorgehoben (Galka et al. 2020). Allerdings ist das AutoStore-System nicht für jeden Anwendungsfall geeignet. Es handelt sich um ein Lagersystem für Kleinteile, was das zu lagernde Sortiment hinsichtlich des Gewichts und der Abmessungen reglementiert.

## 1.1 Bestandteile des AutoStore-Systems

Ein AutoStore-System setzt sich im Wesentlichen aus fünf Komponenten zusammen. Dazu gehören das „Grid“, welches mit den „Bins“ befüllt wird und die „Roboter“, welche die Bins aus dem Grid holen und an die „Ports“ für die Ein- und Auslagerung befördern. Das Ganze wird durch den „Controller“ orchestriert und gesteuert. In der Abbildung 1 ist ein AutoStore-System dargestellt.



*Abbildung 1: AutoStore-System bei einem Logistikdienstleister (Foto: Autor)*

Das Grid wird mit den Bins befüllt, die als Lagerhilfsmittel für die zu lagernden Artikel genutzt werden. Die Grundfläche der Bins ist immer gleich ( $B=449$  mm/ $L=649$  mm). Hinsichtlich der Höhe gibt es unterschiedliche Bins. Da die gesamte Höhe des Autostore-Systems auf 5,40 Meter beschränkt ist, definiert die Höhe der Bins gleichzeitig die maximale Anzahl an Bins, die übereinandergestellt werden können. Die Bins werden von den Robotern gehandhabt. Aktuell werden zwei unterschiedliche Versionen des Roboters angeboten. Die sogenannte „Redline“ (R5) stellt die Basisversion der Roboter dar. Die zweite Version des Roboters wird als „Blackline“ (B1) bezeichnet, die etwas höhere Geschwindigkeiten ermöglicht.

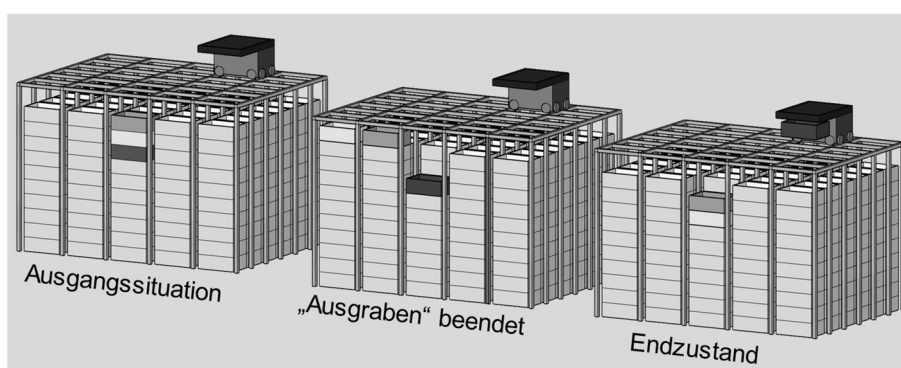
Die vierte wesentliche Komponente eines AutoStore-Systems ist der Port. Die Ports sind die Schnittstelle zu Mitarbeitern, die die Artikel aus den Bins entnehmen oder Artikel in die Bins legen. Aktuell gibt es vier unterschiedliche Porttypen. Diese unterscheiden sich hinsichtlich des maximal möglichen Durchsatzes.

## 1.2 Funktionsweise des AutoStore-Systems

Das AutoStore-System wird in der Regel für die Kommissionierung verwendet. Es handelt sich dabei um eine Ware-zur-Person Kommissionierung (WzP). Wesentlich für die WzP-Kommissionierung ist die Bereitstellung von Artikeln am Arbeitsplatz des Kommissionierers (Port). Dieser Vorgang wird auch als Behälterpräsentation bezeichnet. Nach der Entnahme durch den Kommissionierer muss der Bin wieder rückgelagert werden. Dies erfolgt auch, wenn der Bin leer ist. Leere Bins verbleiben im System und werden bei Bedarf für einen Wareneingang am Port bereitgestellt. Damit muss hinsichtlich des Ablaufs nicht zwischen Wareneingang und Kommissionierung (Warenausgang) unterschieden werden. In beiden Fällen muss der Roboter einen Bin am Port bereitstellen (Auslagerung) und diesen dann später wieder abholen, wie auch zurück ins Grid stellen (Einlagerung).

Im Folgenden wird kurz und vereinfacht der Prozess beschrieben. Eine grafische Darstellung des Vorgangs findet sich in Abb. 2. Die Erläuterungen zur Abbildung sind im Text kursiv dargestellt. Der Controller erhält aus dem überlagerten System den

Auftrag, einen bestimmten Bin auszulagern. Der Controller ermittelt die Position des Bins im Grid (*Im Beispiel muss der grüne Bin ausgelagert werden*). Im besten Fall kann ein Roboter direkt auf den Bin zugreifen, falls sich keine anderen Bins im Stapel über dem benötigten Bin befinden. Ist dies nicht der Fall, erzeugt der Controller Umlageraufträge für die Bins über dem gewünschten Bin. Dies wird auch als „Ausgraben“ bezeichnet. Die „störenden“ Bins werden von einem oder mehreren Robotern umgelagert. Dazu werden die Bins aus dem Schacht entnommen und in einem anderen Schacht abgestellt. (*siehe Abb. 2; „Ausgraben“ beendet*.) Ist der Zugriff auf den benötigten Bin möglich, wird ein Roboter mit dessen Abholung beauftragt. Der Roboter transportiert den Bin dann direkt zum Port oder wenn der Bin dort noch nicht benötigt wird, wird dieser wie die umgelagerten Bins auf einen anderen Stapel (oberste Position) gestellt und später zum Port gebracht (dies wird „Vorbereitung“ genannt). Die umgelagerten Bins verbleiben nicht an der neuen Position. Der Controller beauftragt einen Roboter mit der Rücklagerung dieser Bins. Dabei wird auf die Reihenfolge geachtet. Die Bins werden in der gleichen Reihenfolge in den Schacht wieder eingelagert. (*siehe Abb.2; „Endzustand“*)



**Abbildung 2:** Ablauf der Auslagerung eines Bins (grün)

Dies ist eine der Grundphilosophien des AutoStore-Systems. Nur der Zugriff an einem Port verändert die Position eines Bins im Schacht. Damit wird automatisch eine ABC-Zonierung erreicht, da Artikel mit einer hohen Zugriffshäufigkeit tendenziell weiter oben im Schacht gelagert werden und damit der Aufwand für die Auslagerung von A-Artikel gering ist. In Abhängigkeit der Zugriffsverteilung über das Sortiment liegt die mittlere Grabetiefe oft nur bei 1,5-2,5 Bins. Die mittlere Grabetiefe gibt an, wie viele Bins im Mittel für eine Auslagerung umgelagert werden müssen, damit der Ziel-Bin durch einen Roboter erreicht werden kann.

### 1.3 Planung und Dimensionierung eines AutoStore-Systems

Die Dimensionierung eines AutoStore-Systems ist eine komplexe Fragestellung, da viele unterschiedliche Aspekte die Leistungsfähigkeit der gesamten Anlage beeinflussen. In der Abb. 3 sind die Gestaltungsparameter aufgeführt. Ausgewählte Gesichtspunkte werden im Anschluss diskutiert.

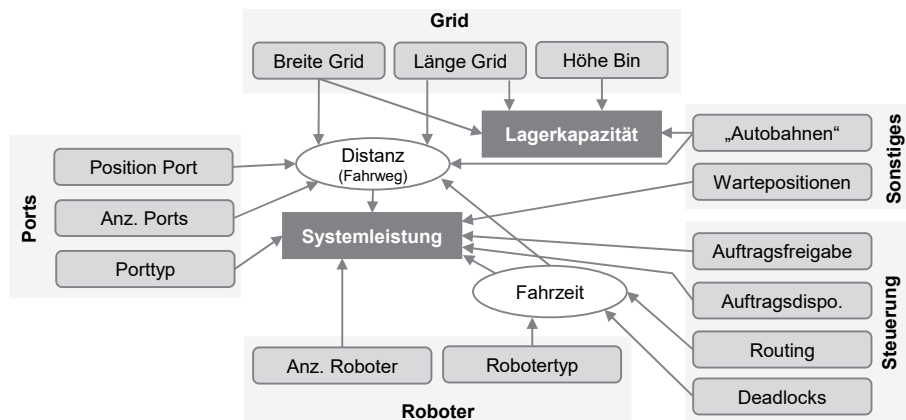


Abbildung 3: Gestaltungsmöglichkeiten und deren Wechselwirkungen

Die Kubatur des Grids kann flexibel gestaltet und dem Gebäude angepasst werden. In der Regel entspricht die Kubatur einem Quader und es wird die maximale Höhe des Grids ausgenutzt. Damit sind die Länge und die Breite des Grids die wesentlichen Gestaltungsparameter, die gemeinsam mit den eingesetzten Bins (Höhe) die Lagerkapazität definieren. Im Zusammenspiel mit der Position und Anzahl der Ports beeinflussen die Gridabmessungen die Distanz, die die Roboter für die Aus- und Einlagerungen zurückzulegen haben.

Die Distanz beeinflusst nicht alleine die Fahrzeit. Neben dem Robotertyp mit seinen spezifischen kinematischen Eigenschaften ist die gewählte Route entscheidend. Da die Roboter bei jeder Richtungsänderung zum Stillstand kommen und anschließend wieder beschleunigen müssen, ist ein häufiger Richtungswechsel nicht vorteilhaft. Zusätzlich müssen bei der Wahl der Route auch der Fahrweg und die Arbeitsposition von anderen Robotern beachtet werden. Um das Routing zu vereinfachen und Behinderungen zwischen den Robotern zu vermeiden, werden häufig Bereiche des Grids für die Lagerung von Bins gesperrt. Solche Bereiche werden als „Autobahn“ bezeichnet, da hier die Roboter ungestört fahren können. Die Nutzung von Autobahnen steigert die Leistungsfähigkeit des Systems, reduziert aber die nutzbare Lagerkapazität des Grids.

Die Auswahl des eingesetzten Porttyps wird im Wesentlichen von den Durchsatzanforderungen am Port beeinflusst. Ports mit einem höheren Durchsatz müssen von mehr Robotern pro Zeiteinheit versorgt werden, was zu einer höheren Verkehrsdichte um den Port führt. Roboter können rechts und links neben der Abgabeposition(en) warten. Liegen die Ports zu eng beieinander, dann sind nicht ausreichend Wartepositionen verfügbar, was leistungsmindernd wirken kann. Die Prozesszeit für die Abgabe der Bins am Port ist abhängig vom Hub- bzw. Senkweg. Ports müssen nicht wie in Abb. 1 dargestellt am Boden positioniert sein. Durch den Einsatz von Bühnen kann der Port angehoben werden, was den Hub- und Senkweg des Roboters reduziert und damit die Abgabe-/Aufnahmezeiten für die Bins am Port mindert.

Neben den dargestellten Parametern, die im Rahmen der Planung definiert werden können, gibt es weitere Aspekte, die die Systemleistung beeinflussen, aber nicht direkt verändert werden können. Wesentlich dabei ist die Verteilung der Zugriffshäufigkeit

über das Sortiment. AutoStore ist geeignet, wenn die Zugriffsverteilung dem Paretoprinzip folgt, da dies zu einer geringen mittleren Grabtiefe führt.

Aspekte wie die Anzahl an Positionen je Auftrag im Zusammenspiel mit der Kommissionierstrategie haben auch Einfluss auf die Leistung, werden an dieser Stelle aber nicht diskutiert.

## 2 Stand der Wissenschaft

In wissenschaftlichen Veröffentlichungen spielt das AutoStore-System bisher eine untergeordnete Rolle. Bipan Zoua et al. untersuchen in ihrem Beitrag den Einfluss von Lagerbelegungsstrategien auf die Leistung eines AutoStore-Systems. Dabei entwickeln die Autoren neue Ansätze, die sich von den in der Praxis genutzten Strategien unterscheiden. Das System wird mithilfe der Warteschlagentheorie modelliert und untersucht. Hierzu wurden starke Vereinfachungen vorgenommen. So werden das Routing der Roboter und das Deadlock-Handling nicht berücksichtigt. (Zoua et al. 2016)

In der Veröffentlichung „Redesign of the AutoStore order processing line: A multi-scenario discrete-event simulation study“ von Tjeerdsma (Tjeerdsma 2019) wird die Auftragsabwicklung in einem Fulfillment Center der niederländischen Post betrachtet. Dabei geht es nicht direkt um die Leistung des AutoStore-Systems. Vielmehr untersucht Tjeerdsma Ansätze, wie das Sortiment zwischen AutoStore und anderen Lagerbereichen aufgeteilt werden sollte und welchen Einfluss die Aufteilung auf die Konsolidierungsaufwände hat.

In einer weiteren Veröffentlichung untersucht Odland Håvås die technische Verfügbarkeit von AutoStore-Systemen und mögliche Vorteile eines Predictive Maintenance Ansatzes für ein AutoStore-System. Die eigentliche Systemleistung spielt bei dieser Untersuchung keine Rolle. (Odland 2018)

Lienert (2018) beschäftigt sich in seinem Beitrag „Simulation-based Performance Analysis in Robotic Mobile Fulfillment Systems“ mit einem Ware-zur-Person-Kommissioniersystem, bei welchem durch mobile Roboter (Fahrerlose-Transportfahrzeuge) Ladungsträger zu Pickstationen transportiert werden. Bestimmte Aspekte lassen sich auf AutoStore-System übertragen. Allerdings unterscheidet sich das Routing in einem gassenbasierten System deutlich von den Möglichkeiten auf einem „Grid“, bei dem zu jeder Zeit die Möglichkeit eines Richtungswechsels gegeben ist. Gleiches gilt auch für das Deadlock-Handling. Allerdings lassen sich teilweise Ansätze von Lienert et al. auf die Modellierung eines AutoStore-Systems übertragen. (Lienert 2021)

Andere Beiträge wie von Deatcu et al. (2018) behandeln Shuttle-basierte Lagersysteme und nutzen die Simulation für die Untersuchung dieser Technik. Auch diese Systeme unterscheiden sich im Verhalten und den Betriebsstrategien vom AutoStore-System, was sich wieder mit den Möglichkeiten des Routings begründen lässt.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass sich bisher noch keine Veröffentlichung mit der simulationsbasierten Abbildung eines AutoStore-Systems befasst hat. Durch die Entwicklung eines herstellerneutralen Simulationsmodells für ein AutoStore-System und die Durchführung von Parameterstudien sollen Gestaltungshinweise für

Planer und Nutzer erarbeitet werden. Damit soll das asymmetrisch verteilte Wissen zwischen Planern/Nutzern und Herstellern/Integratoren angeglichen werden.

### 3 Abbildung des Systems in einem Simulationsmodell

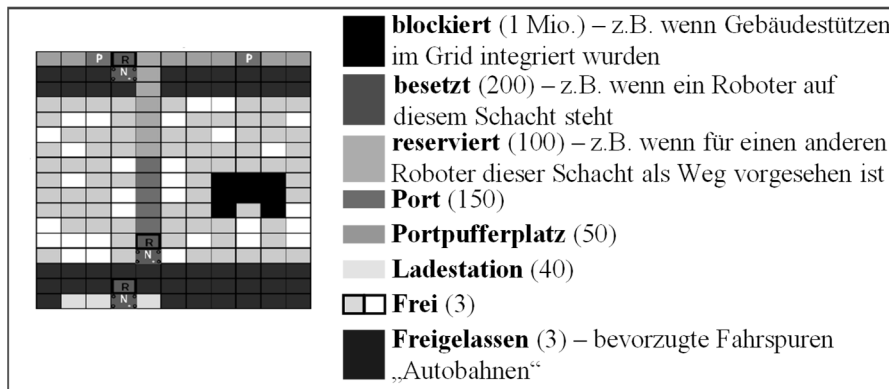
Für die Untersuchung wurde ein parametrierbares Simulationsmodell in Plant Simulation eingesetzt. Neben den in Abb. 3 aufgezeigten Aspekten lassen sich weitere Parameter wie die Prozesszeiten am Port und Vorgaben für die Auftragsgenerierung festlegen. Im Folgenden werden ausgewählte Aspekte der Simulation beschrieben.

Bei der Initialisierung des Modells wird der Füllgrad der Schächte bestimmt, da nicht alle Schächte mit der gleichen Anzahl an Bins befüllt werden (entsprechend des vorgegebenen Füllgrades). Eine Bestandsverwaltung wurde nicht implementiert, vielmehr wird durch den Auftragsgenerator zufällig ein Schacht für den auszulagernden Bin ausgewählt. Dies entspricht einer Gleichverteilung der Zugriffshäufigkeit über alle Schächte. Die Position des Bins innerhalb des Schachtes ist abhängig von der festgelegten Höhenverteilung und wird durch den Auftragsgenerator unter Berücksichtigung der Anzahl von Bins im ausgewählten Schacht bestimmt. Bei der Festlegung des Einlagerschachtes wird der Füllstand des Schachtes beachtet. Das Auftragsmanagement bevorzugt Schächte mit einer geringeren Anzahl an Bins.

Nach dem Abschluss eines Auftrages durch den Roboter erfolgt die Zuweisung eines neuen Auftrages. Für die Auslageraufträge ist neben dem Ausgangspunkt (Schacht und Position im Schacht) auch das Ziel (Port) bekannt. Zuerst wird geprüft, wie viele Aufträge für den Ziel-Port bereits von anderen Robotern bearbeitet werden. Ist die maximale Anzahl bereits erreicht, besteht die Möglichkeit, den Auftrag vorzubereiten. Dabei wird der Bin ausgegraben und in der Nähe des Ports abgestellt. Auch die Anzahl der vorzubereitenden Aufträge ist begrenzt. Wenn auch die maximale Anzahl der vorzubereitenden Aufträge erreicht wurde, wird der Auftrag zurückgestellt und ein Auslagerauftrag für einen anderen Port überprüft. Sollte kein Auftrag verfügbar sein, wird der Roboter auf einer Ladestation geparkt.

Muss der Bin ausgegraben werden, werden durch das Auftragsmanagement Umlageraufträge erzeugt. Der eigentliche Auslagerauftrag wird zurückgestellt und es werden zuerst die Umlageraufträge dem Roboter zugewiesen. Nachdem der Roboter die Auslagerung vorgenommen hat, werden Umlageraufträge für die Rücklagerung der umgelagerten Bins erstellt, die einem freien Roboter zugewiesen werden.

Die Roboter bewegen sich auf der obersten Ebene des Grids und können an jeder Position des Grids die Richtung wechseln. Dazu müssen die Roboter zum Stillstand kommen und einen Umsetzungsvorgang ausführen. Weiterhin können Bins im Grid so abgestellt werden, dass diese zwar vom Roboter aufgenommen werden können, aber der Roboter an dieser Stelle nicht mehr über das Grid fahren kann. Im Rahmen der Wegeplanung wird mithilfe eines angepassten A\*-Algorithmus der Weg mit der geringsten erwarteten Fahrzeit bestimmt. Bei jedem Aufruf der Wegefindung wird ein gerichteter Graph erstellt (je Schacht ein Knoten), dessen Kantenbewertung abhängig vom aktuellen Systemzustand ist. Abb. 4 zeigt ein Beispiel und die Kennwerte, die zur Bestimmung der Kantenbewertung herangezogen werden.



**Abbildung 4:** Visualisierung im Modell (links) und Kantenbewertungen in Abhängigkeit vom aktuellen Systemzustand (Bewertungszahl in Klammern)

Aufgrund der Berechnungszeit für die Wegfindung bei großen Grid-Abmessungen wurde diese Funktion als externes Modul in der Programmiersprache C++ implementiert.

Die Steuerungsstrategien wurden aufgrund von Beobachtungen realer AutoStore-Systeme entwickelt, da keine Informationen von AutoStore zu den verwendeten Algorithmen verfügbar sind. Das Modell wurde anhand von Bewegungsdaten einer realen Anlage validiert. Die Simulationsergebnisse haben sich um ca. 12 % von den Kennwerten der realen Anlage unterschieden.

## 4 Untersuchung der Grenzproduktivität

Mithilfe der Simulationsstudie soll untersucht werden, welchen Einfluss die Anzahl der eingesetzten Roboter auf die Systemleistung hat. Es ist davon auszugehen, dass bei zunehmender Anzahl an Robotern auf gleicher Fläche (Grid) mehr Behinderungen zwischen den Robotern auftreten und dies zu einem abnehmenden „Grenznutzen“ von zusätzlichen Robotern im System führt. Im Abschnitt 4.1 wird aufgezeigt, welche Experimente für diese Studie durchgeführt wurden. Die Ergebnisse und daraus resultierende Schlussfolgerungen werden im Abschnitt 4.2 dargestellt.

### 4.1 Experimentendesign

Im Rahmen der Simulationsstudie wurden 225 Experimente durchgeführt, wobei im Normalfall 5 Replikationen pro Experiment simuliert wurden. Die Experimente unterscheiden sich durch die Anzahl der eingesetzten Ports und Roboter. Da bekannt ist, dass die Verteilung der Zugriffe im Stapel einen wesentlichen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit des Systems hat, wurden zusätzlich vier unterschiedliche Verteilungen der Zugriffe über den Stapel untersucht. In der folgenden Abb. 5 werden die variierten Parameter (dunkelgrau) und die konstanten Parameter (helles grau) zusammengefasst. Weiterhin sind die genutzten Zugriffverteilungen in einem Diagramm abgebildet.

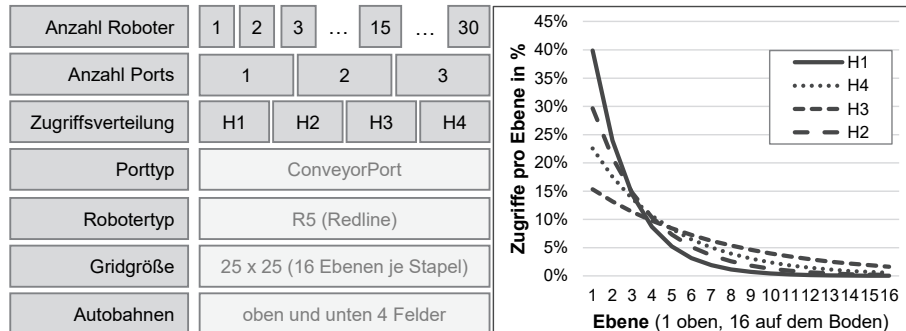


Abbildung 5: Übersicht über die variierten Parameter in den Experimenten

Die Prozesszeit für die Entnahme bzw. das Befüllen der Bins am Port beträgt im Mittel 10 Sekunden mit einer Standardabweichung von 2 Sekunden. Für die Experimente stehen ausreichend Aufträge zur Verfügung, sodass die Roboter nie auf einen neuen Auftrag warten müssen.

Für alle Höhenverteilungen wurde eine Roboteranzahl von eins bis 15 untersucht. Ergänzend wurden für die Höhenverteilung H1 weitere Experimente mit einer Roboteranzahl bis 30 durchgeführt.

## 4.2 Interpretation der Simulationsergebnisse

Die dargestellten Simulationsergebnisse basieren auf Mittelwerten, die aus den Kennwerten der einzelnen Replikationen berechnet wurden.

In Tabelle 1 ist die Systemleistung in Behälterpräsentationen pro Stunde dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Systemleistung höher ist, wenn die mittlere zu grabende Tiefe kleiner ist, da pro Auslagervorgang weniger Bins umgelagert werden müssen.

Tabelle 1: Systemleistung in Aufträgen (Bins)/Stunde und mittlere Grabtiefe

Anzahl Ports	Höhenverteilung H1			Höhenverteilung H2			Höhenverteilung H3			Höhenverteilung H4		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1 Roboter	39	41	42	29	32	34	23	24	26	17	18	29
2 Roboter	73	81	85	56	61	65	45	47	49	36	35	56
5 Roboter	147	171	186	113	132	139	88	102	107	75	80	113
10 Roboter	198	281	306	160	214	232	136	159	178	119	133	160
15 Roboter	189	345	397	177	263	297	163	204	226	159	172	177
Grabtiefe	2,50			3,31			4,24			5,55		

In Abhängigkeit der Anzahl Ports und der Höhenverteilung sinkt die Systemleistung ab einer bestimmten Anzahl von Robotern im System. Dieser Effekt lässt sich auf zwei Ursachen zurückführen. Zum einen nehmen die Behinderungen und Wartezeiten am Port bei zunehmender Anzahl an Robotern zu, zum anderen werden keine weiteren Aufträge freigegeben, wenn die maximale Anzahl an Aufträgen für die Auslagerung bzw. Vorbereitung erreicht wurde. Ohne diese Vorgabe steigt der Anteil der Blockierungen bzw. Wartezeiten (durch mehr Richtungswechsel) an. Im Diagramm in Abb. 6 sind die Zeitanteile für eine Systemkonfiguration mit einem Port und der Höhenverteilung H1 dargestellt. Der Anteil der Fahrzeiten und Handhabungszeiten



nimmt mit steigender Anzahl an Robotern sukzessive ab, hingegen steigt der Zeitanteil für das Warten und Laden (wenn kein Auftrag verfügbar ist, wird der Roboter zum Laden geschickt). Ähnliche Verläufe zeigen sich auch bei den anderen Experimenten.

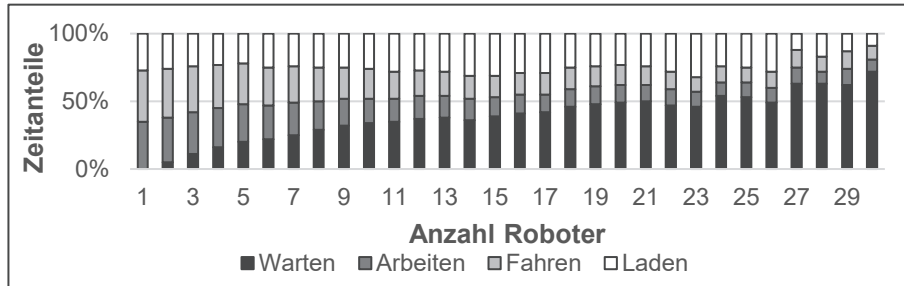


Abbildung 6: Zeitanteile für die Experimente mit 1 Port (H1)

Abschließend soll die Grenzproduktivität aufgezeigt werden. Darunter wird die zusätzliche Systemleistung verstanden, die durch den Einsatz eines weiteren Roboters erzielt werden kann. In der Abb. 7 ist der Verlauf der Grenzproduktivität für die Experimente mit der Zugriffsverteilung H1 visualisiert.

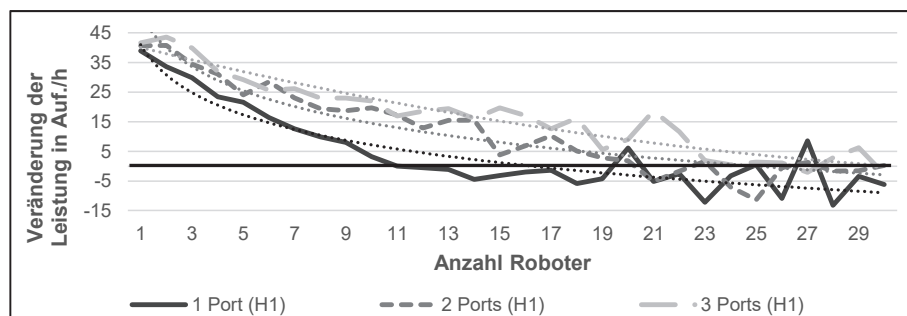


Abbildung 7: Grenzproduktivität für die Experimentreihe der Höhenverteilung H1

Die Simulationsergebnisse haben gezeigt, dass die Zugriffsverteilung, die Anzahl der Ports und die Anzahl der Roboter maßgeblich die Leistung eines AutoStore-Systems beeinflussen. Beispielsweise sollten im untersuchten Beispiel (H1, 1 Port) nicht mehr als 11 Roboter eingesetzt werden, da durch den Einsatz weiterer Roboter die Systemleistung reduziert wird. Diese Kennzahl ist für jedes untersuchte Beispiel unterschiedlich und eine Verallgemeinerung dieser Kennzahl ist nicht möglich. Neben der Zugriffsverteilung wird dieser Kennwert auch durch die Gridgröße beeinflusst, die nicht variiert wurde. Auch wird die Binhöhe (Anzahl Bins pro Stapel) Einfluss auf diesen Kennwert haben.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Die Leistungsfähigkeit eines AutoStore-Systems wird von vielen Faktoren beeinflusst. Einige dieser Faktoren sind durch den Anwendungsfall vorgegeben und können durch die Systemgestaltung nicht verändert werden. Grundsätzlich sollte im Rahmen der Planung die Frage beantwortet werden, ob das AutoStore-Lagersystem eine geeignete Technologie ist. Neben den Artikeleigenschaften (Abmessung und Gewicht) ist vor allem die Zugriffsverteilung über das Sortiment entscheidend für die Eignung des AutoStore-Systems. Andere Aspekte wie die Anzahl an Ports und Roboter können im Rahmen der Planung definiert werden. Analytisch lässt sich die Leistungsfähigkeit des Systems nur abschätzen, fundierte Aussagen können mit Simulationsstudien abgeleitet werden. Die durchgeführten Experimente haben gezeigt, dass die Anzahl der Roboter auf die Anzahl der Ports und die Gridgröße abgestimmt sein muss. Vor allem bei einer geringen Anzahl an Ports kann eine hohe Anzahl an Robotern die Gesamtsystemleistung verschlechtern. Es wird empfohlen, ein AutoStore-System im Rahmen der Planung zu simulieren, um die Wechselwirkungen der Systemelemente im ausreichenden Maße zu berücksichtigen.

Eine durchgeführte Befragung von AutoStore-Nutzern hat darüber hinaus ergeben, dass die Prozesszeiten am Port Beachtung finden sollten. Weiterhin haben viele Nutzer berichtet, dass sich Anforderungen (Aufträge) über den Tag verändern und dezidiert untersucht werden sollten. (Galka 2020)

## Danksagung

Das Simulationsmodell wurde im Rahmen einer Abschlussarbeit in Kooperation mit der Miebach Consulting GmbH entwickelt. An dieser Stelle sei Dr. Jens Zimmermann und Markus Nadj für die fachliche Betreuung und die eingebrachte Expertise gedankt.

## Literatur

- Deatcu C., Schramm T., Zobel K.: Simulationsmodell eines Shuttle-Systems zur Ermittlung des Systemverhaltens, Tagungsband ASIM 2018, Hamburg
- Galka S., Troesch L., Scherbarth C.: AutoStore- Was Nutzer über das System berichten können. OTH Regensburg, 2020
- Lienert T., Staab T., Ludwig C., Fottner J.: Simulation-based Performance Analysis in Robotic Mobile Fulfilment Systems: Analyzing the Throughput of Different Layout Configurations. München, 2018.
- Lienert, T.: Methodik zur simulationsbasierten Durchsatzanalyse FTF-basierter Kommissioniersysteme. Dissertation, TU München, München. Vorab. überl.2021.
- Odland A.-C.: Model to develop cost effective preventive maintenance program for material handling robot in intelligent warehousing system: A case study in AutoStore AS. Master's Thesis, University of Stavanger, 01.06.2018.
- Tjeerdsma S.: Redesign of the AutoStore order processing line: A multi-scenario discrete-event simulation study. Master thesis, University of Twente, 01.06.2019.
- Website Handling.de, <https://www.handling.de/lager-und-logistik/autostore-faehrt-2019-solides-finanzergebnis-ein.htm>. Aufruf am: 12.08.2020.
- Zoua, B., De Koster R., Xua X.: Evaluating dedicated and shared storage policies in robot-based compact storage and retrieval systems. PhD thesis, Huazhong University of Science and Technology. 21.12.2016