

# Optimierung der Auslagerungsprozesse in automatisierten Kompaktlagern

Nicolas Fauvé, Florian Jaehn  
*Institut für Management Science und Operations Research  
Helmut-Schmidt-Universität  
Universität der Bundeswehr Hamburg  
Hamburg, Deutschland  
nicolas.fauve@hsu-hh.de*

Julian Golak, Yagmur Gül,  
Philipp Koch, Simone Neumann  
*Institut für Nachhaltige Logistik- und Mobilitätssysteme/  
Institut für Operations Management  
Universität Hamburg  
Hamburg, Deutschland*

Alice Kirchheim  
*Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik IML  
Dortmund, Deutschland*

Lara Nehrke  
*Institut für Beschaffung und Produktion  
Helmut-Schmidt-Universität  
Universität der Bundeswehr Hamburg  
Hamburg, Deutschland*

**Zusammenfassung**—Um einen schnellen Zugriff auf die gelagerten Artikel zu gewährleisten, gibt es verschiedene Arten von Lagersystemen. Eine Reihe von Faktoren, darunter die physische Größe und das Gewicht der zu lagernden Artikel, die Nutzungshäufigkeit und die verfügbaren Ressourcen, bestimmen, welcher Systemtyp für ein bestimmtes Lager am besten geeignet ist. In diesem Beitrag soll ein neuer Typ von Lagersystemen untersucht werden: Kompaktlagersysteme. Kompaktlagersysteme zielen darauf ab, eine möglichst hohe Raumausnutzung bei begrenztem Lagerplatz zu erreichen. Zwar ist solch ein Lager platzsparend, allerdings ist die Entnahme von Artikeln aus Kompaktlagersystemen komplex. Durch die dichte Anordnung sind die Ladeeinheiten oft nicht direkt zugänglich, da sie von anderen Einheiten verdeckt werden. Diese müssen erst verschoben oder umpositioniert werden, um genügend Platz für den Zugriff auf das gewünschte Objekt zu schaffen. Dies führt zu komplexen Entscheidungsprozessen. Da das Umpositionieren von Ladeeinheiten Energie verbraucht, trägt eine effiziente Entscheidungsfindung direkt zu einem energieeffizienten Lagersystem bei. Dies erfordert die Entwicklung von algorithmischen Unterstützungssystemen, die in der Lage sind, optimale Entnahmestrategien in angemessener Zeit zu berechnen. In diesem Bericht geben wir einen Überblick über die Annahmen und das strukturelle Optimierungsproblem, das diesen Entnahmestrategien zugrunde liegt. Darüber hinaus bieten wir Einblicke in die Berechenbarkeit und die algorithmischen Ansätze, die zur Ableitung effizienter Lösungen verwendet werden.

**Index Terms**—Logistik, Algorithmen, Lagersysteme,

## I. EINFÜHRUNG

In den letzten Jahren ist die Anzahl der Bestellungen stark gestiegen. Dies hat zu einem erhöhten Bedarf an Lagern geführt, insbesondere in urbanen Gebieten, wo Platz knapp und teuer ist. Traditionelle Lagersysteme, bei denen Ladeeinheiten oder Artikel einfach in Regalen gelagert werden, sind zwar simpel und ermöglichen eine effiziente Auslagerung, brauchen jedoch viel Platz, da zwischen den Regalen genügend Raum für Menschen oder Roboter zum Manövrieren gelassen werden muss. Dies motiviert die Untersuchung von Kompaktlagersystemen. In Kompaktlagersystemen werden die

Ladeeinheiten (also die Boxen oder Behälter, im Folgenden als Unit Loads (ULs) bezeichnet) so dicht wie möglich aneinandergereiht, um eine optimale Nutzung des Platzes zu gewährleisten. Diese Systeme erfordern eine komplexere Ein- und Auslagerung, die von autonomen Robotern übernommen wird. AutoStore<sup>1</sup> ist ein Beispiel für ein solches Kompaktlagersystem. Dabei gibt es keine Regale mit festen Gängen, sondern die einzelnen ULs, die einheitlich sind und die eingelagerten Artikel enthalten, werden direkt übereinander und nebeneinander gestapelt. Die Ein- und Auslagerung erfolgt über temporäre Gänge, die durch das Anheben der ULs entstehen. Wir betrachten ein Lagersystem, bei dem die ULs von der Seite ausgelagert werden können. In einem dichten Layout sind die ULs oft nicht direkt zugänglich, da sie von anderen Einheiten verdeckt werden. Um auf einen bestimmten UL zugreifen zu können, müssen möglicherweise andere Einheiten zuerst verschoben oder umpositioniert werden. Dies führt zu komplexen Entscheidungsprozessen. Da das Umpositionieren von ULs Energie verbraucht, ist eine effiziente Entscheidungsfindung elementar für die Energieeffizienz des Lagersystems.

Dieses neuartige Kompaktlagersystem mit Zugriff von der Seite wirft eine Vielzahl von Problemstellungen auf, die alle zu komplex sind, um allein durch menschliche Intuition gelöst zu werden. Dies motiviert die Entwicklung algorithmischer Entscheidungssysteme, die in der Lage sind, gute oder optimale Entscheidungen in kurzer Rechenzeit zu treffen. Um solche algorithmischen Ansätze zu entwickeln und zu analysieren, benötigen wir eine Beschreibung, Intuition und Einblick in die einzelnen Teilprobleme, die betrachtet werden müssen. In diesem Artikel greifen wir eines dieser Probleme auf und zeigen dem Leser die Herausforderung und mögliche Lösungsansätze.

Bisher wurden solche Kompaktlagersysteme von der akademischen Fachliteratur kaum betrachtet und es gibt nur zwei

<sup>1</sup><https://de.autostoresystem.com>

Publikationen, die genau dieses Problem adressieren. Fauvé und Neumann [1] führen diese Systeme ein und diskutieren Modellierungs- und Kostenfaktoren. Von Fauvé et al. [2] werden sowohl bereits auf dem Markt existierende Kompaktlager wie AutoStore und Ocado betrachtet, als auch grundsätzliche technische und organisatorische Rahmenbedingungen solcher Lagersysteme. Da AutoStore und Ocado lediglich von oben auf das Lager zugreifen und gemäß dem LiFo-Prinzip (Last in – First out) funktionieren, wird gezeigt, dass auch Systeme mit seitlicher Ein- und Auslagerung möglich sind, die flexiblere und effizientere Durchlaufzeiten bieten.

## II. GRUNDLAGEN

In diesem Abschnitt bieten wir eine Betrachtung der grundlegenden Problemstrukturen, die dem seitlichen Zugriff auf Lagertypen zugrunde liegen.

Wir untersuchen ein Lagersystem, in dem ULs vertikal gestapelt werden, sodass die gesamte Anordnung die Form eines Quaders annimmt (siehe Abbildung 1). Diese ULs müssen eine maximale Stapelhöhe einhalten, um eine effiziente Raumnutzung zu gewährleisten.

Autonome Fahrzeuge, sogenannte *Shuttles*, sind für den Transport der ULs verantwortlich. Diese Shuttles können die ULs eigenständig anheben und bewegen. Sie werden mithilfe von Aufzügen auf die gewünschte Höhe im Quader angehoben und können dann in den Quader einfahren, sofern ausreichend Platz vorhanden ist. Dieser notwendige Platz wird durch integrierte Hebesysteme geschaffen, die einen Teil des Stapels anheben und so einen tunnelähnlichen Raum erzeugen, in dem sich die Shuttles bewegen können (siehe Abbildung 2). Die Shuttles nutzen diesen Raum, um die ULs aus dem Quader herauszuholen. Zusätzlich bewegen sich die Shuttles innerhalb des Quaders auf einem Schienensystem, das oben auf den ULs angebracht ist. Dieses System verhindert, dass sich die Shuttles innerhalb des Quaders drehen.

Zur Vereinfachung betrachten wir in unserem Modell nur eine einzelne Spalte des Quaders. Wir nehmen außerdem an, dass die Shuttles nur von einer Seite in das System einfahren können. Diese Annahme erleichtert die Darstellung erheblich, da Probleminstanzen als zweidimensionale Gitter modelliert werden können. Eine Verallgemeinerung der Probleminstanz auf den gesamten Quader ist zwar direkt möglich, jedoch sehr aufwendig. In der Praxis können solche Probleme auftreten, wenn der Platz auf allen anderen Seiten des Quaders eingeschränkt ist. In diesen Fällen reduziert sich das Problem auf die Steuerung der Auslagerung einzelner Spalten, was unserer vereinfachten Modellbetrachtung entspricht.

## III. BESCHREIBUNG DES AUSLAGERUNGSPROZESSES

Im Folgenden beschreiben wir die Modellierung des Auslagerungsprozesses, also den Ablauf der Bearbeitung eines Kundenauftrags. Dabei erläutern wir die einzelnen Schritte, die notwendig sind, um die angeforderten Waren aus dem Lager zu entnehmen.

Kundenbestellungen umfassen Artikel, die in den ULs gelagert sind. Um diese Bestellungen effizient zu bearbeiten,

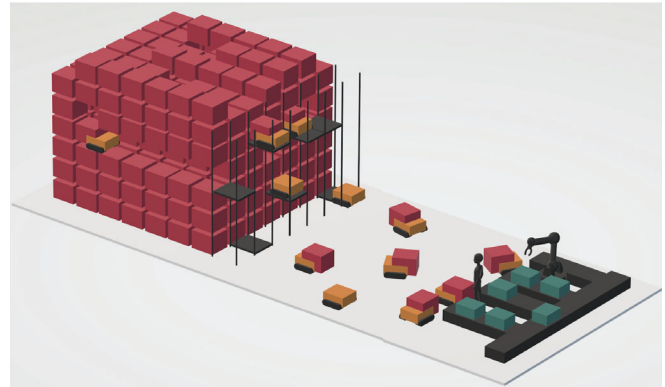


Abbildung 1: ILLUSTRATION DES LAGERLAYOUTS MIT DEN GESTAPELTEN ULS SOWIE DEN SEITLICHEN AUFZÜGEN UND HEBESYSTEME. DIE SEITLICHEN AUFZÜGE HEBEN DIE SHUTTLES AUF DIE RICHTIGE HÖHE, UND DIE HEBESYSTEME SCHAFFEN DURCH ANHEBEN DER ULS PLATZ FÜR DAS SHUTTLE IM QUADER.

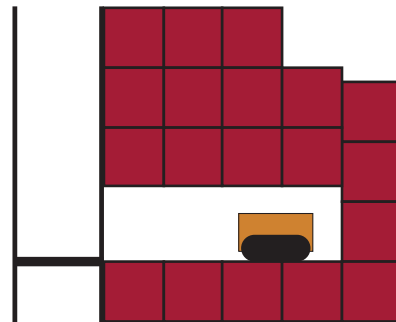


Abbildung 2: ILLUSTRATION DES VEREINFACHTEN LAGERLAYOUTS MIT DEN GESTAPELTEN ULS UND ZUGANG VON LINKS.

wird im Voraus festgelegt, welche spezifischen ULs ausgelagert werden sollen. Diese Vorabentscheidung trägt dazu bei, Konflikte zu vermeiden und stellt sicher, dass die Aufträge effektiv aufgeteilt und bearbeitet werden können.

Nehmen wir an, es gibt eine Liste der auszulagernden ULs. Jede UL hat eine bestimmte Höhe und eine spezifische Position im Stapel innerhalb des Lagers. Der Auslagerungsprozess dieser ULs wird in mehrere Schritte oder Zyklen unterteilt. In jedem Zyklus wird entschieden, welche ULs angehoben werden müssen, um die gewünschten Artikel zu erreichen.

Für jeden dieser Zyklen muss der Bediener festlegen, welche ULs angehoben werden sollen und in welcher Reihenfolge die auszulagernden ULs ausgelagert werden. Dies wird durch die Anzahl, die in jedem Stapel während eines Zyklus angehoben wird, dargestellt. Nach der Auslagerung einer UL wird diese zu einem externen Ablageort gebracht und nicht wieder in das Lager zurückgeführt. In jedem Zyklus muss gewährleistet sein, dass die ULs, die ausgelagert werden sollen, tatsächlich erreichbar sind. Dabei ist zu beachten, dass das Shuttle nur auf bereits vorhandenen ULs fahren kann. Es ist daher notwendig sicherzustellen, dass keine ULs zwischen dem Einstiegspunkt des Shuttles und den gewünschten ULs liegen, die nicht ebenfalls bewegt oder entnommen werden.

Wir stellen fest, dass unterschiedliche Entnahmereihenfolgen der ULs zu verschiedenen Konfigurationen führen. ULs, die sich oberhalb einer entnommenen UL befinden, fallen sozusagen nach unten, was bedeutet, dass in den nachfolgenden Zyklen andere Konfigurationen von ULs vorliegen. Dies führt dazu, dass genaue Entscheidungen über die Reihenfolge der Entnahme erforderlich sind, um eine Optimalität entsprechend einer Zielfunktion zu gewährleisten. Diese Beobachtung impliziert, dass jede Entscheidung über die Reihenfolge der Entnahme direkten Einfluss auf die zukünftige Lagerkonfiguration und damit auf die Zugänglichkeit der verbleibenden ULs hat. Um eine optimale Entnahmestrategie zu entwickeln, müssen alle möglichen Konfigurationsänderungen berücksichtigt und die Reihenfolge der Entnahme entsprechend geplant werden.

#### IV. ZIELFUNKTIONEN

Unser Ziel ist es, den Energieverbrauch des Lagersystems zu minimieren, wobei der größte Teil des Energieverbrauchs durch das Anheben der ULs entsteht, um den benötigten Platz zu schaffen. Die Energie, die zum Anheben einer UL erforderlich ist, kann mithilfe der Formel für potenzielle Gravitationsenergie berechnet werden:  $E = m \cdot g \cdot h$ . Hierbei steht  $E$  für die potenzielle Gravitationsenergie,  $m$  für die Masse des Objekts,  $g$  für die Erdbeschleunigung und  $h$  für die Höhe, auf die das Objekt angehoben wird.

Diese Formel verdeutlicht, dass die Energie, die zum Anheben eines Objekts benötigt wird, direkt proportional zu dessen Gewicht ist, wobei das Gewicht das Produkt aus Masse und Gravitationsbeschleunigung darstellt. Um die Berechnungen zu vereinfachen, nehmen wir an, dass alle ULs das gleiche Gewicht haben. Dies führt dazu, dass der gesamte Energieaufwand direkt proportional zur Anzahl der angehobenen ULs ist. Um die Analyse weiter zu vereinfachen, normalisieren wir die Gewichte der ULs.

Die Eingabe für den Optimierungsalgorithmus besteht aus einer Darstellung des Lagersystems, nämlich einer Liste der Höhen der jeweiligen Stapel und einer Liste der auszulagernden ULs. Die Ausgabe, oder Lösung, wird durch eine Sequenz von Zyklen dargestellt, in denen festgelegt wird, welche ULs angehoben werden, um den erforderlichen Platz für das Shuttle zu schaffen, und welche ULs aus dem Kundenauftrag entnommen werden. Diese Lösung ist gültig, wenn alle ULs des Kundenauftrags entnommen wurden und jede dieser ULs zugänglich ist. Das Ziel des Optimierungsalgorithmus besteht darin, eine zulässige Lösung zu finden, die den Energieverbrauch minimiert.

#### V. BEISPIEL ZUR VERANSCHAULICHUNG DES PROBLEMS

In diesem Abschnitt wird das Problem anhand eines konkreten Beispiels illustriert, siehe Abbildung 3 und 4. Wir betrachten eine Instanz des Problems der Auslagerung von ULs aus einem Kompaktlager mit fünf Stapeln, deren Höhen wie folgt definiert sind: Der erste Stapel hat eine Höhe von 4, der zweite eine Höhe von 3, der dritte eine Höhe von 4, der vierte eine Höhe von 4 und der fünfte eine Höhe von 5.

Weiterhin liegt uns ein Kundenauftrag vor, der die ULs  $\{b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, b_6, b_7\}$  umfasst. Jede UL  $b$  ist einem spezifischen Stapel und einer bestimmten Höhenposition zugeordnet. Die Positionen der ULs sind wie folgt:  $b_1$  befindet sich im Stapel 1 auf Höhe 3,  $b_2$  im Stapel 3 auf Höhe 3,  $b_3$  im Stapel 4 auf Höhe 4,  $b_4$  im Stapel 4 auf Höhe 1,  $b_5$  im Stapel 5 auf Höhe 5,  $b_6$  im Stapel 5 auf Höhe 2 und  $b_7$  im Stapel 5 auf Höhe 1 (siehe Abbildung 3a). Zur besseren Übersicht werden die ULs durch Koordinaten identifiziert, das heißt, zu Beginn ist  $b_1$  mit  $(1,3)$  identifiziert.

Im ersten Zyklus wird die UL  $b_6$  entnommen, die sich an Position  $(5,2)$  befindet. Dazu müssen alle ULs angehoben werden, die sich links, links oberhalb und oberhalb von  $b_6$  befinden. Die ULs, die sich links befinden, werden um etwas mehr als die Höhe eines ULs angehoben, damit der entstandene Platz ausreicht, damit das Shuttle in den Tunnel einfahren und das gewünschte UL entnehmen kann. Bei der Kalkulation der Kosten ignorieren wir den marginalen Höhenunterschied und nehmen an, dass die Energie dem Anheben der Anzahl der ULs entspricht. Die ULs, die sich über  $b_6$  befinden, werden ebenfalls um eine Höhe angehoben, da aus Sicherheitsgründen ein Mindestabstand zwischen den ULs eingehalten werden muss. Daher entspricht auch hier die Energie der Anzahl der angehobenen ULs. Das sind insgesamt 14 ULs, was einen Energieaufwand von 14 Energieeinheiten bedeutet. Nach diesem Zyklus ist die Höhe von Stapel 5 um 1 reduziert (siehe Abbildung 3b).

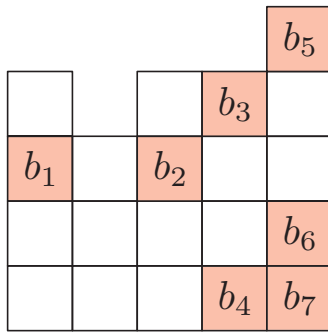
Im zweiten Zyklus werden die ULs  $b_4$  und  $b_7$  entnommen, die sich an Positionen  $(4,1)$  und  $(5,1)$  befinden. Dafür müssen alle ULs um die Höhe eines ULs angehoben werden, die sich oberhalb von  $b_4$  und  $b_7$  und links der beiden ULs befinden. Insgesamt werden somit 17 ULs angehoben, was einen Energieaufwand von 17 Energieeinheiten für diesen Zyklus bedeutet. Nach diesem Zyklus sind die Stapel 4 und 5 um eine (weitere) Höhe reduziert (siehe Abbildung 4a).

Im dritten Zyklus stellen wir fest, dass sich die restlichen vier ULs alle auf einer Höhe befinden. Daher können wir alle restlichen ULs in einem Zyklus auslagern. Dafür müssen alle ULs angehoben werden, die sich über und zwischen den auszulagernden ULs befinden. Insgesamt werden somit drei ULs angehoben, was einen Energieaufwand von drei Energieeinheiten für diesen Zyklus bedeutet.

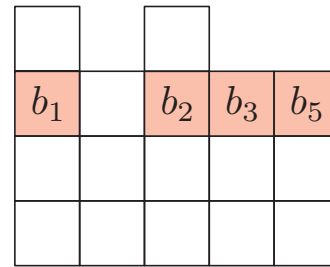
Nach dem dritten Zyklus sind alle ULs ausgelagert, und somit ist das Problem gelöst. Zusammengefasst wurden alle ULs des Kundenauftrags entnommen, und der gesamte Energieverbrauch beträgt 22 Energieeinheiten (siehe Abbildung 4b).

#### VI. ALGORITHMISCHE LÖSUNGSANSÄTZE

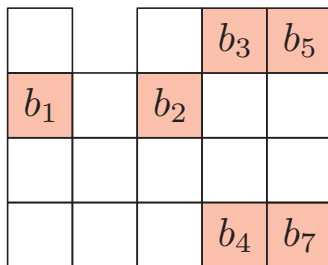
In diesem Abschnitt diskutieren wir verschiedene Ansätze zur Entwicklung von Algorithmen zur Lösung des Problems der effizienten Auslagerung in Kompaktlagern. Dabei betrachten wir sowohl einfache heuristische Methoden als auch komplexe Ansätze, die auf mathematischer Optimierung basieren. Ziel ist es, die unterschiedlichen Strategien zu beleuchten, ihre Vor- und Nachteile zu erörtern und aufzuzeigen, wie sie zur Verbesserung der Lagerlogistik beitragen können.



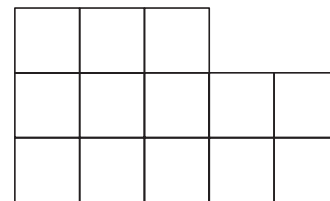
(a) ANFANGSINSTANZ, BEVOR EINE UL ENTNOMMEN WIRD.



(a) ULS  $b_4$  UND  $b_7$  WERDEN IN EINEM ZYKLUS AUSGELAGERT MIT ENERGIEAUFWAND VON 17.



(b) UL  $b_6$  WIRD IM ERSTEN ZYKLUS MIT ENERGIEAUFWAND VON 14 AUSGELAGERT.



(b) ULS  $b_1, b_2, b_3$  UND  $b_4$  WERDEN IN EINEM ZYKLUS AUSGELAGERT MIT ENERGIEAUFWAND VON 3. ALLE AUSZULAGERNDEN ULS SIND SOMIT AUSGELAGERT.

Abbildung 3: ILLUSTRATION DES ENTNAHMEPROZESSES: TEIL 1. IN ROT HERVORGEHOBN DIE AUSZULAGERNDEN ULS.

Abbildung 4: ILLUSTRATION DES ENTNAHMEPROZESSES: TEIL 2. IN ROT HERVORGEHOBN DIE AUSZULAGERNDEN ULS.

Im Manuskript von Fliedner, Golak, Gül und Neumann zeigen die Autoren durch eine Verbindung zu einer Klasse von Partitionierungsproblemen, dass das Problem NP-vollständig ist [3]. NP-Vollständigkeit ist ein Konzept in der Informatik, das verwendet wird, um die Schwierigkeit bestimmter Probleme zu beschreiben. Ein Problem ist NP-vollständig, wenn es zwei Bedingungen erfüllt: Erstens muss es in der Klasse NP liegen, was bedeutet, dass eine vorgeschlagene Lösung für das Problem in polynomieller Zeit überprüft werden kann. Zweitens muss jedes andere Problem in NP auf dieses Problem in polynomieller Zeit reduzierbar sein, was bedeutet, dass eine effiziente Lösung für dieses Problem auch effiziente Lösungen für alle anderen Probleme, die in NP liegen, ermöglichen würde.

Die Implikationen für Algorithmen sind erheblich. Wenn ein Problem als NP-vollständig klassifiziert wird, gibt es keine bekannte Methode, um es schnell (in Polynomialzeit) für alle Fälle zu lösen. Das bedeutet, dass Algorithmen, die solche Probleme lösen, in der Regel sehr zeitaufwendig sind und ihre Laufzeit exponentiell mit der Größe des Eingabeproblems zunimmt. In der Praxis bedeutet dies oft, dass für NP-vollständige Probleme nur für kleine Instanzen Lösungen gefunden werden können oder dass Approximationsalgorithmen und heuristische Methoden verwendet werden müssen, um

brauchbare Lösungen in vernünftiger Zeit zu finden.

Für die Entwicklung optimaler Lösungen können Methoden wie mathematische Programmierung oder dynamische Programmierung eingesetzt werden. Diese Ansätze zielen darauf ab, exakte Lösungen zu finden, sind jedoch oft rechnerisch sehr intensiv und daher für große Probleminstanzen nicht immer praktikabel. Mathematische Programmierung umfasst Techniken wie lineare Programmierung, gemischt-ganzzahlige Programmierung und nichtlineare Programmierung, die darauf abzielen, eine optimale Lösung innerhalb der gegebenen Beschränkungen zu finden. Dynamische Programmierung hingegen zerlegt das Problem in kleinere Teilprobleme und löst diese rekursiv, was jedoch ebenfalls hohe Rechenressourcen erfordert.

Alternativ können Ansätze entwickelt werden, die keine exakte Lösung finden, aber dennoch praktikable und effiziente Lösungen bieten. Einfache heuristische Methoden wie der Greedy-Algorithmus sind leicht zu verstehen und zu implementieren. Der Greedy-Algorithmus trifft in jedem Schritt die lokal beste Entscheidung, was oft schnell zu guten, wenn auch nicht immer optimalen Lösungen führt. Diese Methode ist besonders nützlich, wenn schnelle Entscheidungen gefragt sind und die Problemgröße groß ist.

Komplexere Heuristiken, die unter den Rahmen von Meta-

heuristiken fallen, bieten eine weitere Möglichkeit, effektive Lösungen zu finden. Simulated Annealing und genetische Algorithmen sind zwei prominente Beispiele. Simulated Annealing ist von den physikalischen Prozessen des Abkühlens inspiriert und erlaubt gelegentliche Verschlechterungen der Lösung, um lokale Minima zu vermeiden und so bessere globale Lösungen zu finden. Dieser Ansatz hat sich in vielen Optimierungsproblemen als sehr effektiv erwiesen. Genetische Algorithmen basieren auf den Prinzipien der natürlichen Selektion und Evolution. Sie arbeiten mit einer Population von Lösungen, die durch Kreuzung und Mutation neue Lösungen erzeugen. Diese neuen Lösungen werden basierend auf ihrer Fitness bewertet, und die besten Lösungen werden ausgewählt, um die nächste Generation zu bilden. Genetische Algorithmen sind besonders nützlich für komplexe Probleme mit großen Lösungsräumen, da sie durch ihre stochastischen Elemente eine breite Exploration des Lösungsraums ermöglichen.

Zusätzlich zu diesen Ansätzen könnten auch hybride Methoden und maschinelles Lernen in Betracht gezogen werden, um die Lösungsqualität weiter zu verbessern. Hybride Methoden kombinieren verschiedene Optimierungstechniken, um die Stärken jeder Methode zu nutzen und ihre Schwächen zu minimieren. Maschinelles Lernen kann verwendet werden, um Muster in den Daten zu erkennen und darauf basierend bessere Heuristiken zu entwickeln.

Insgesamt bieten diese verschiedenen algorithmischen Ansätze eine breite Palette an Möglichkeiten zur Lösung des Problems der effizienten Auslagerung in Kompaktlagern. Die Wahl des geeigneten Ansatzes hängt von den spezifischen Anforderungen und Beschränkungen des jeweiligen Lagersystems ab.

## VII. SCHLUSSFOLGERUNGEN UND ZUKÜNFTIGE FORSCHUNG

In diesem Abschnitt präsentieren wir weitere Forschungsthemen, die eine algorithmische Untersuchung erfordern, um die Effizienz und Effektivität von Lagersystemen weiter zu verbessern.

Ein bedeutendes Forschungsthema im Bereich der Lagerlogistik ist das sogenannte Housekeeping, insbesondere während Zeiten, in denen keine Aufträge eingehen, wie beispielsweise nachts. Das Hauptziel besteht darin, das Lager effizient zu reorganisieren, um eine vordefinierte Zielkonfiguration zu erreichen. Hierbei stellt sich die Frage, wie das Lager umorganisiert werden kann, sodass zukünftige Auslagerungen möglichst energie- und zeiteffizient durchgeführt werden können. Dies erfordert die Entwicklung von Algorithmen, die in der Lage sind, optimale oder zumindest sehr gute Umorganisationen des Lagers zu berechnen. Diese Algorithmen müssen eine Vielzahl von Faktoren berücksichtigen, darunter die aktuelle Lagerkonfiguration, die erwarteten zukünftigen Anforderungen sowie die physikalischen Beschränkungen des Lagersystems. Die Herausforderung besteht darin, eine Balance zwischen den unmittelbaren Kosten der Umorganisation und den langfristigen Einsparungen bei den Auslagerungsvorgängen zu finden.

Ein weiteres relevantes Forschungsthema ist die Bestimmung einer optimalen Zielkonfiguration des Lagers. Dies kann durch die Einführung von Stochastizität erreicht werden. Wenn für jeden Container eine Wahrscheinlichkeitsverteilung für seine zukünftige Nutzung bekannt ist, kann die Güte einer Konfiguration quantifiziert werden. Das Ziel besteht darin, eine Lagerkonfiguration zu finden, die die erwarteten zukünftigen Zugriffe minimiert.

Diese Forschungsthemen bieten spannende Möglichkeiten für die Weiterentwicklung der Lagerlogistik. Die Entwicklung neuer Algorithmen und Modelle zur Verbesserung der Lagerorganisation und -effizienz kann zu erheblichen Einsparungen und Leistungssteigerungen führen. Es bleibt jedoch noch viel Arbeit zu tun, um diese Herausforderungen zu bewältigen und praktische Lösungen zu finden, die in realen Lagerumgebungen angewendet werden können. Die kontinuierliche Zusammenarbeit zwischen Forschern und Praktikern wird entscheidend sein, um die entwickelten Theorien und Modelle in die Praxis zu überführen und deren Wirksamkeit zu demonstrieren.

## ACKNOWLEDGMENT

Die Autor:innen bedanken sich für die Förderung bei dtec.bw – Zentrum für Digitalisierungs- und Technologieforschung der Bundeswehr. Das dtec.bw – Zentrum für Digitalisierungs- und Technologieforschung der Bundeswehr – ist ein von den Universitäten der Bundeswehr Hamburg und München gemeinsam getragenes wissenschaftliches Zentrum und Bestandteil des Konjunkturprogramms der Bundesregierung zur Überwindung der COVID-19- Krise. Es unterliegt der akademischen Selbstverwaltung. Die Mittel, mit dem das dtec.bw ausgestattet wurde, werden an beiden Universitäten der Bundeswehr zur Finanzierung von Forschungsprojekten und Projekten zum Wissens- und Technologietransfer eingesetzt. dtec.bw wird von der Europäischen Union – NextGenerationEU finanziert.

## LITERATUR

- [1] N. Fauvé and S. Neumann, "Storage and Retrieval in Fully Automated Grid-Based Storage Systems." *International Conference on Operations Research*. Cham: Springer International Publishing, 2022.
- [2] N. Fauvé, F. Jaehn, M. Azizpour, B. Hein, A. Kirchheim, and S. Neumann, "Technische und methodische Analyse von automatisierten Kompaktlagern." *dtec.bw-Beiträge der Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg*, 2022.
- [3] M. Fliedner, J. Golak, Y. Gül, and S. Neumann, "Order Retrieval in Compact Storage Systems" *Arbeitspapier*, 2024.