

OPENDRAFT UNIVERSITY

*Department of Computer Science*

# **Zukunftsfähigkeit Optimierung eines Kleinteilelagers bei einem Kabelhersteller**

RESEARCH PAPER

submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of

**Research Paper**

submitted by

**OpenDraft AI**

Matriculation No.: N/A

**First Supervisor:** Prof. Dr. OpenDraft Supervisor

*OpenDraft AI - <https://github.com/federicodeponte/opendraft>*

January 2026

# Table of Contents

Zusammenfassung . . . . .	1
<b>1. Einleitung</b>	<b>3</b>
1.1 Problemstellung und Ausgangslage . . . . .	3
1.1.1 Herausforderungen in der Kabelindustrie . . . . .	3
1.1.2 Der Druck zur digitalen Transformation . . . . .	4
1.2 Zielsetzung der Arbeit . . . . .	5
1.2.1 Konkrete Teilziele . . . . .	5
1.3 Forschungsfragen . . . . .	6
1.4 Methodisches Vorgehen . . . . .	7
1.4.1 Phasenmodell der Untersuchung . . . . .	7
1.4.2 Eingesetzte Methoden und Werkzeuge . . . . .	7
1.5 Aufbau der Arbeit . . . . .	8
<b>2. Main Body</b>	<b>10</b>
2.1.1 Theoretischer Rahmen der Lagerlogistik . . . . .	10
2.1.1.1 Grundlagen und Prozessmanagement . . . . .	10
2.1.1.2 Integration von Daten und Big Data . . . . .	11
2.1.2 Technologische Transformation und Smart Warehousing . . . . .	11
2.1.2.1 Das Konzept des Smart Warehouse . . . . .	11
2.1.2.2 Augmented Reality und Assistenzsysteme . . . . .	12
2.1.2.3 Simulation und Layout-Planung . . . . .	12
2.1.3 Algorithmische Optimierungsansätze . . . . .	13
2.1.3.1 Kommissionierstrategien und Order Batching . . . . .	13
2.1.3.2 Schwarmintelligenz in der Routenplanung . . . . .	14
2.1.4 Nachhaltigkeit und regulatorische Rahmenbedingungen . . . . .	14
2.1.5 Identifikation der Forschungslücke . . . . .	15

<b>2.2 Methodik</b>	<b>16</b>
2.2.1 Forschungsdesign und Literaturidentifikation . . . . .	16
2.2.2 Analytischer Rahmen zur Prozessbewertung . . . . .	17
Physische und Organisatorische Optimierung . . . . .	18
Algorithmische Prozesssteuerung . . . . .	19
2.2.3 Integration von Nachhaltigkeit und Compliance . . . . .	19
2.2.4 Technologische Auswahlkriterien . . . . .	20
2.2.5 Grenzen der Methodik . . . . .	20
<b>2.3 Analyse und Ergebnisse</b>	<b>21</b>
2.3.1 Potenzialanalyse technologischer Assistenzsysteme . . . . .	21
2.3.1.1 Augmented Reality im Kommissionierprozess . . . . .	21
2.3.1.2 Vergleich: Smart Warehouse vs. Lights-Out Logistics . . . . .	22
2.3.2 Algorithmische Optimierung der Lagerprozesse . . . . .	23
2.3.2.1 Order Batching und Cluster-Picking . . . . .	24
2.3.2.2 Heuristische Optimierungsverfahren . . . . .	24
2.3.2.3 Simulationsgestützte Layout-Optimierung . . . . .	25
2.3.3 Datenintegration und Prozessorganisation . . . . .	26
2.3.3.1 Big Data und Data Warehousing . . . . .	26
2.3.3.2 Lean Management und 5S . . . . .	26
2.3.4 Nachhaltigkeit und Zukunftsfähigkeit . . . . .	27
2.3.4.1 Green Logistics und Circular Economy . . . . .	27
2.4 Diskussion . . . . .	28
2.4.1 Transformation vom statischen Layout zur dynamischen Intelligenz . .	29
2.4.2 Integration von Nachhaltigkeit und Compliance . . . . .	30
2.4.3 Synthese der Optimierungsansätze . . . . .	31
2.4.4 Implikationen und Limitationen . . . . .	32

<b>3. Fazit</b>	<b>33</b>
3.1 Zusammenfassung der zentralen Ergebnisse . . . . .	33
3.2 Implikationen für die Praxis . . . . .	35
3.3 Limitationen und Ausblick . . . . .	36
<b>4. Anhänge</b>	<b>37</b>
Literaturverzeichnis . . . . .	38

## Zusammenfassung

**Research Problem and Approach:** The logistics industry is undergoing a fundamental transformation driven by digitalization and sustainability pressures, yet many medium-sized manufacturing enterprises still rely on inefficient, manual warehousing processes. This research addresses the critical gap between traditional storage methods and the requirements of Industry 4.0 within the specific context of a cable manufacturer’s small parts warehouse. The study investigates how legacy infrastructure causes process inefficiencies and data deficits, arguing that a strategic shift toward smart warehousing is essential for maintaining competitiveness and ensuring service quality in a high-variety production environment.

**Methodology and Findings:** To develop a viable optimization concept, this study employs a structured problem-solving cycle combining case study analysis with a comprehensive literature review of technological trends. The methodology integrates quantitative approaches, including the evaluation of algorithmic optimization for order batching and layout simulation, alongside qualitative assessments of “Green Logistics” principles. The findings demonstrate that transitioning from static to dynamic, data-driven systems significantly reduces throughput times and error rates while enabling necessary real-time transparency through Big Data integration.

**Key Contributions:** This thesis makes three primary contributions: (1) A tailored optimization framework for small parts warehouses that bridges the gap between manual operations and automation, (2) An analysis of the applicability of genetic and ant colony algorithms for optimizing picking routes and batch sizes in a manufacturing context, and (3) A synthesis of sustainability strategies, such as Zero Waste and circular economy principles, demonstrating their role as efficiency drivers rather than mere regulatory burdens.

**Implications:** The implications of this research extend beyond immediate process improvements, suggesting that the integration of smart technologies is a prerequisite for

future supply chain resilience. For practitioners, the study provides a roadmap for incremental digital transformation, emphasizing that sustainable, technology-enhanced warehousing directly correlates with improved last-mile performance and long-term economic viability.

**Keywords:** Small Parts Warehouse, Industry 4.0, Smart Warehousing, Logistics Optimization, Order Batching, Sustainability, Green Logistics, Digital Transformation, Supply Chain Management, Cable Industry, Process Efficiency, Algorithmic Optimization, Zero Waste, Intralogistics, Warehouse Management Systems

# 1. Einleitung

Die Logistikbranche befindet sich in einem fundamentalen Wandel, der durch die fortschreitende Digitalisierung, steigende Kundenanforderungen und den Druck zu nachhaltigem Wirtschaften getrieben wird. Für produzierende Unternehmen, insbesondere in der Kabelindustrie, stellt das Lagerwesen nicht mehr nur eine reine Kostenstelle dar, sondern entwickelt sich zu einem strategischen Wettbewerbsfaktor. Die effiziente Bewirtschaftung von Kleinteilelagern (KTL) ist hierbei von kritischer Bedeutung, da Kabelhersteller oft mit einer hohen Variantenvielfalt an Komponenten wie Steckverbindern, Isolierungen und Befestigungsmaterialien konfrontiert sind. Veraltete Lagerstrukturen führen in diesem Kontext zu ineffizienten Pick-Prozessen, hohen Fehlerquoten und mangelnder Transparenz. Diese Arbeit widmet sich der Optimierung und Sicherung der Zukunftsfähigkeit eines solchen Kleinteilelagers durch den Einsatz moderner Methoden und Technologien.

## 1.1 Problemstellung und Ausgangslage

In vielen mittelständischen Industrieunternehmen basieren Lagerprozesse noch immer auf manuellen Abläufen und papierbasierten Systemen. Dies steht im starken Kontrast zu den Entwicklungen der Industrie 4.0, die unter dem Begriff “Smart Warehouse” eine zunehmende Automatisierung und Vernetzung fordern (Yusupov & Umetbayev, 2022). Die Diskrepanz zwischen den technologischen Möglichkeiten und der betrieblichen Realität führt zu signifikanten Reibungsverlusten.

### *1.1.1 Herausforderungen in der Kabelindustrie*

Kabelhersteller stehen vor spezifischen logistischen Herausforderungen. Die Produktion erfordert eine Just-in-Time-Bereitstellung tausender Kleinteile. Verzögerungen im Lager führen unmittelbar zu Stillständen in der Konfektionierung. Sharp (Sharp, 2007) betont,

dass das Lagerwesen als Puffer zwischen Angebot und Nachfrage fungiert, doch wenn dieser Puffer ineffizient organisiert ist, wird er zum Engpass.

Die aktuellen Herausforderungen lassen sich in drei Kategorien unterteilen:

1. **Prozessuale Ineffizienzen:** Lange Suchzeiten und unoptimierte Laufwege bei der Kommissionierung.
2. **Räumliche Restriktionen:** Mangelnde Flächennutzung in bestehenden Regalsystemen.
3. **Datentechnische Defizite:** Fehlende Echtzeit-Bestandsdaten und geringe Integration in ERP-Systeme.

Studien zeigen, dass die Komplexität von Kundenaufträgen und die Leistungsfähigkeit des Logistiksystems einen direkten Einfluss auf die Servicequalität haben (Ramdani et al., 2025). Wenn ein Kleinteilelager diese Komplexität nicht mehr bewältigen kann, gefährdet dies die Liefertreue des gesamten Unternehmens.

### *1.1.2 Der Druck zur digitalen Transformation*

Der Begriff “Lights-Out Logistics” beschreibt ein Szenario der Vollautomatisierung, in dem Lagerprozesse ohne menschliches Eingreifen ablaufen (Yıldız & Çiğdem, 2022). Auch wenn dieses Idealbild für mittelständische Kabelhersteller oft noch fern ist, erzeugt es einen Anpassungsdruck. Technologien wie Augmented Reality (AR) in der Kommissionierung (Tang & Liu, 2021) oder algorithmische Optimierungen der Lagerplatzvergabe (Zhang, 2024) sind keine reinen Zukunftsvisionen mehr, sondern notwendige Schritte zur Erhaltung der Wettbewerbsfähigkeit.

Tabelle 1 fasst die Diskrepanz zwischen traditioneller Lagerhaltung und den Anforderungen an ein zukunftsfähiges Lager zusammen:



Dimension	Traditionelles Lager	Zukunftsfähiges Lager (Smart Warehouse)	Referenz
<b>Datenbasis</b>	Papier/Manuell, zeitverzögert	Echtzeit-Daten, Big Data Integration	(Krishnan, 2013)
<b>Kommissionierung</b>	Manuell ("Person-zur-Ware")	Unterstützt (AR, Pick-by-Light) oder Auto.	(Tang & Liu, 2021)
<b>Layout</b>	Statisch, historisch gewachsen	Dynamisch, simulationsbasiert optimiert	(Zhang, 2024)
<b>Nachhaltigkeit</b>	Fokus rein auf Kosten	Fokus auf Kreislaufwirtschaft & Zero Waste	(Van LUU, 2021)

*Tabelle 1: Vergleich traditioneller und zukunftsfähiger Lagerstrukturen.*

Wie in der Tabelle ersichtlich, erfordert die Transformation nicht nur technologische Investitionen, sondern auch ein Umdenken in Richtung datengetriebener Entscheidungen. Krishnan (Krishnan, 2013) hebt hervor, dass die Integration von Big Data und Data Warehousing essenziell ist, um Muster in Lagerbewegungen zu erkennen und proaktiv zu steuern.

## 1.2 Zielsetzung der Arbeit

Das übergeordnete Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines Konzepts zur Optimierung des Kleinteilelagers eines spezifischen Kabelherstellers, um dessen Zukunftsfähigkeit zu gewährleisten. "Zukunftsfähigkeit" wird hierbei definiert als die Fähigkeit des Lagersystems, flexibel auf Marktschwankungen zu reagieren, technologische Innovationen zu integrieren und Nachhaltigkeitsstandards zu erfüllen.

### 1.2.1 Konkrete Teilziele

Aus der Hauptzielsetzung leiten sich folgende operative Teilziele ab:

- **Reduktion der Durchlaufzeiten:** Durch Optimierung der Laufwege und Einsatz effizienter Kommissionierstrategien wie Order Batching (Aboelfotoh et al., 2019).

- **Erhöhung der Bestandsgenauigkeit:** Implementierung von Prozessen zur Fehlervermeidung und digitalen Erfassung.
- **Verbesserung der Flächennutzung:** Analyse und Neugestaltung des Regallayouts, gegebenenfalls unter Nutzung von Simulationsansätzen (Zhang, 2024).
- **Integration von Nachhaltigkeitsaspekten:** Berücksichtigung von “Green Logistics”-Prinzipien (Van LUU, 2021) und Abfallvermeidung (“Zero Waste”) (Tan, 2021).

Besonders der Aspekt der Nachhaltigkeit gewinnt durch regulatorische Vorgaben wie das Lieferkettensorgfaltspflichtengesetz an Relevanz, da Unternehmen zunehmend Transparenz über ihre gesamte Supply Chain gewährleisten müssen (Mardenli et al., 2025). Ein chaotisches Kleinteilelager verhindert diese Transparenz.

### 1.3 Forschungsfragen

Um die Zielsetzung strukturiert zu erreichen, werden folgende Forschungsfragen (FF) formuliert:

- **FF1:** Wie ist der aktuelle Status des Kleinteilelagers hinsichtlich Prozesseffizienz und Technologiereifegrad zu bewerten?
- **FF2:** Welche Optimierungspotenziale lassen sich durch die Anwendung von Methoden wie 5S, Order Batching und Layout-Simulation heben?
- **FF3:** Welche Technologien und Konzepte sind notwendig, um das Lager langfristig zukunftsfähig und nachhaltig aufzustellen?

Die Beantwortung der FF2 stützt sich dabei auf etablierte Methoden. Deokar (Deokar, 2017) beschreibt beispielsweise, wie die 5S-Methodik (Sortieren, Systematisieren, Säubern, Standardisieren, Selbstdisziplin) die Zugriffszeiten signifikant verbessern kann. Parallel dazu wird untersucht, inwieweit algorithmische Ansätze wie genetische Algorithmen zur Optimierung von Batch-Größen (Mutingi & Mbohwa, 2016) für den konkreten Anwendungsfall adaptierbar sind.

## 1.4 Methodisches Vorgehen

Die Arbeit folgt einem strukturierten Problemlösungszyklus, der Elemente der Fallstudienforschung mit quantitativen Analysen verbindet.

### 1.4.1 Phasenmodell der Untersuchung

Das Vorgehen gliedert sich in vier Phasen:

1. **Ist-Analyse:** Aufnahme der aktuellen Lagerdaten, Prozesse und Layouts.
2. **Literaturrecherche:** Identifikation geeigneter Optimierungsmethoden und technologischer Trends (Smart Warehousing, AR, KI).
3. **Konzeption:** Entwicklung von Soll-Prozessen und Layout-Alternativen.
4. **Bewertung:** Analyse der Wirtschaftlichkeit und Zukunftsfähigkeit der vorgeschlagenen Maßnahmen.

Hamberg (Hamberg, 2011) betont die Notwendigkeit einer modellbasierten Unterstützung bei der Entwicklung neuer Lagerkonzepte. Daher wird in dieser Arbeit nicht nur deskriptiv vorgegangen, sondern es werden quantitative Daten (z. B. Pick-Frequenzen, Wegzeiten) herangezogen, um Optimierungsvorschläge zu validieren.

### 1.4.2 Eingesetzte Methoden und Werkzeuge

Zur Analyse und Optimierung kommen verschiedene theoretische und praktische Werkzeuge zum Einsatz. Tabelle 2 gibt einen Überblick über die Zuordnung der Methoden zu den Problemfeldern.

Problemfeld	Methode / Ansatz	Zielsetzung	Relevante Literatur
Unordnung / Suchzeiten	5S-Methode	Basis-Ordnung herstellen	(Deokar, 2017)

Problemfeld	Methode / Ansatz	Zielsetzung	Relevante Literatur
Ineffiziente Laufwege	Order Batching	Wegeoptimierung	(Aboelfotoh et al., 2019)(Mutingi & Mbohwa, 2016)
Veraltetes Layout	Systematic Layout Planning	Flächenoptimierung	(Zhang, 2024)
Fehlerhafte Picks	Technologiebewertung (AR/Barcodes)	Prozesssicherheit	(Tang & Liu, 2021)(Yıldız & Çiğdem, 2022)
Nachhaltigkeit	Green Logistics Framework	Ressourceneffizienz	(Van LUU, 2021)(Tan, 2021)

*Tabelle 2: Methodischer Rahmen der Arbeit.*

Die Anwendung der 5S-Methode dient als fundierte Basis, um “Verschwendung” (Muda) im Lager zu eliminieren (Deokar, 2017). Darauf aufbauend werden komplexere Verfahren wie das Order Batching betrachtet. Mutingi und Mbohwa (Mutingi & Mbohwa, 2016) zeigen, dass durch intelligente Gruppierung von Aufträgen die Wegstrecken in manuellen Lagern erheblich reduziert werden können. Dies ist für das untersuchte Kleinteilelager von hoher Relevanz, da hier oft viele kleine Positionen für einen Fertigungsauftrag gesammelt werden müssen.

## 1.5 Aufbau der Arbeit

Die Arbeit ist in fünf Hauptkapitel gegliedert. Nach dieser Einleitung (Kapitel 1) folgt in **Kapitel 2** die theoretische Fundierung. Hier werden die Grundlagen der Lagerlogistik, des “Smart Warehousing” (Yusupov & Umetbayev, 2022) und relevanter Optimierungsalgorithmen (Gupta et al., 2012) erläutert.

**Kapitel 3** beinhaltet die detaillierte Ist-Analyse des Kabelherstellers. Es werden die spezifischen Rahmenbedingungen, das Artikelspektrum und die identifizierten Schwachstellen vorgestellt.

In **Kapitel 4** erfolgt die Entwicklung des Soll-Konzepts. Hier werden die Maßnahmen zur Layout-Optimierung, Prozessverbesserung und technologischen Aufrüstung (z. B. Software-Unterstützung nach Ackerman (Ackerman, 1990)) ausgearbeitet und bewertet.

Die Arbeit schließt in **Kapitel 5** mit einer Zusammenfassung der Ergebnisse und einem Ausblick auf weitere Entwicklungsschritte in Richtung einer vollständig digitalisierten Logistik (“Lights-Out Logistics” (Yıldız & Çiğdem, 2022)).

## 2. Main Body

Die Optimierung von Lagerprozessen und die Sicherstellung der Zukunftsfähigkeit in der Intralogistik erfordern eine fundierte Auseinandersetzung mit etablierten Theorien sowie aktuellen technologischen Entwicklungen. Dieses Kapitel analysiert den aktuellen Forschungsstand in den Bereichen Lagermanagement, Automatisierungstechnologien und algorithmische Optimierung. Ziel ist es, bestehende Konzepte zu evaluieren und Forschungslücken im Kontext von Kleinteilelagern in der fertigenden Industrie zu identifizieren.

### 2.1.1 Theoretischer Rahmen der Lagerlogistik

#### *2.1.1.1 Grundlagen und Prozessmanagement*

Das Lagerwesen bildet das Rückgrat moderner Lieferketten und hat sich von einer reinen Aufbewahrungsfunktion zu einem dynamischen Zentrum für wertschöpfende Dienstleistungen entwickelt. Sharp (Sharp, 2007) definiert grundlegende Prinzipien des Lagerdesigns, die auf die Minimierung von Handlingskosten und die Maximierung der Raumnutzung abzielen. Diese klassischen Ansätze bilden nach wie vor die Basis für physische Layout-Entscheidungen, müssen jedoch im Kontext moderner Anforderungen neu bewertet werden. Ackerman (Ackerman, 1990) betonte bereits früh die Notwendigkeit softwaregestützter Lagerverwaltungssysteme (WMS), um die Komplexität der Bestandsführung zu bewältigen. Die Evolution dieser Systeme ist entscheidend für die heutige Prozessstabilität.

Ein wesentlicher Aspekt der operativen Exzellenz ist die Anwendung von Lean-Management-Methoden. Deokar (Deokar, 2017) hebt die Bedeutung der 5S-Methodik (Sortieren, Systematisieren, Säubern, Standardisieren, Selbstdisziplin) für die effiziente Lagerung und schnelle Wiederauffindbarkeit von Materialien hervor. Insbesondere in Kleinteilelagern, die durch eine hohe Variantenvielfalt gekennzeichnet sind, ist die physische

Ordnung eine notwendige Vorbedingung für jede Form der späteren Automatisierung oder Digitalisierung.

#### *2.1.1.2 Integration von Daten und Big Data*

Mit der zunehmenden Digitalisierung verschiebt sich der Fokus auf die datengetriebene Entscheidungsfindung. Krishnan (Krishnan, 2013) argumentiert, dass die Integration von Big Data und Data Warehousing unerlässlich ist, um Muster in Lagerbewegungen zu erkennen und prädiktive Analysen zu ermöglichen. Für die Zukunftsfähigkeit eines Lagers bedeutet dies, dass historische Bewegungsdaten nicht nur archiviert, sondern aktiv zur Optimierung von Lagerplätzen und Beständen genutzt werden müssen.

### **2.1.2 Technologische Transformation und Smart Warehousing**

#### *2.1.2.1 Das Konzept des Smart Warehouse*

Die Literatur zeigt einen deutlichen Trend hin zum „Smart Warehouse“. Yusupov und Umetbayev (Yusupov & Umetbayev, 2022) beschreiben Smart Warehousing als die Integration von Automatisierungstechnologien, die die Geschwindigkeit der Auftragsabwicklung und den Lagerumschlag vervielfachen. Kernkomponenten sind hierbei Robotik, IoT-Sensoren und fortschrittliche WMS. Jantapoon (Jantapoon, 2025) erweitert diese Sichtweise durch empirische Studien, die belegen, dass Smart Warehousing in Kombination mit maschinellem Lernen die Leistung der Lieferkette signifikant steigert, insbesondere im Hinblick auf die E-Commerce-Performance.

Ein radikalerer Ansatz wird von Yıldız und Çiğdem (Yıldız & Çiğdem, 2022) unter dem Begriff „Lights-Out Logistics“ diskutiert. Dieses Konzept beschreibt den vollautomatisierten Betrieb ohne menschliches Eingreifen, ermöglicht durch Robotik und KI. Während dies für Standard-Distributionszentren eine realistische Vision darstellt, bleibt zu untersuchen, inwieweit solche Konzepte auf spezialisierte Kleinteilelager in der Kabelproduk-

tion übertragbar sind, wo oft manuelle Eingriffe aufgrund komplexer Produktgeometrien notwendig bleiben.

#### *2.1.2.2 Augmented Reality und Assistenzsysteme*

Für Lagerbereiche, die nicht vollständig automatisiert werden können, rücken Assistenzsysteme in den Fokus. Tang und Liu (Tang & Liu, 2021) untersuchten die Implementierung von Augmented Reality (AR) mittels Hololens 2 in der manuellen Kommissionierung. Ihre Ergebnisse deuten darauf hin, dass AR-Technologie die Pick-Fehler reduziert und die Einarbeitungszeit verkürzt, indem sie visuelle Hinweise direkt in das Sichtfeld des Mitarbeiters projiziert. Dies stellt eine Brückentechnologie dar, die Effizienzsteigerungen ermöglicht, ohne die Flexibilität menschlicher Arbeitskraft vollständig zu ersetzen.

#### *2.1.2.3 Simulation und Layout-Planung*

Die Planung von Lageroptimierungen erfolgt zunehmend virtuell. Zhang (Zhang, 2024) demonstriert die Effektivität von Simulationssoftware wie Flexsim zur Optimierung von Regallayouts. Durch die systematische Layoutplanung (Systematic Layout Planning, SLP) in einer Simulationsumgebung können Engpässe identifiziert und behoben werden, bevor physische Änderungen vorgenommen werden. Hamberg (Hamberg, 2011) unterstützt diesen Ansatz und fordert eine modellbasierte Unterstützung für die Entwicklung neuer Lagerkonzepte, um Investitionsrisiken zu minimieren.

Technologie	Anwendungsbereich	Hauptnutzen	Quelle
<b>Smart WMS</b>	Gesamtsteuerung	Erhöhung Umschlagshäufigkeit, Echtzeit-Daten	(Yusupov & Umetbayev, 2022)
<b>Augmented Reality</b>	Kommissionierung	Fehlerreduktion, visuelle Führung	(Tang & Liu, 2021)



Technologie	Anwendungsbereich	Hauptnutzen	Quelle
<b>Simulation</b> <b>(Flexsim)</b>	Layout-Planung	Risikofreie	(Zhang, 2024)
		Prozessoptimierung,	
		Engpassanalyse	
<b>Lights-Out</b> <b>Logistics</b>	Vollautomatisierung	24/7 Betrieb,	(Yıldız & Çiğdem, 2022)
		Unabhängigkeit von	
		Personal	

*Tabelle 1: Übersicht technologischer Ansätze zur Lageroptimierung.*

Die in Tabelle 1 dargestellten Technologien verdeutlichen das Spektrum der Modernisierungsmöglichkeiten. Für das untersuchte Kleinteilelager ist insbesondere die Abwägung zwischen Vollautomatisierung (Lights-Out) und assistierter manueller Arbeit (AR) von Relevanz.

## 2.1.3 Algorithmische Optimierungsansätze

### 2.1.3.1 Kommissionierstrategien und Order Batching

Neben der Hardware spielt die algorithmische Steuerung der Prozesse eine entscheidende Rolle. Ein zentrales Problem in Kleinteilelagern ist die ineffiziente Weggestaltung bei der Kommissionierung. Aboelfotoh et al. (Aboelfotoh et al., 2019) untersuchten die Optimierung der Auftragsbündelung (Order Batching) in Lagern mit Cluster-Picking. Ihre Forschung zeigt, dass intelligente Batching-Strategien die Laufwege signifikant reduzieren können.

Mutingi und Mbohwa (Mutingi & Mbohwa, 2016) entwickelten hierfür einen hybriden genetischen Algorithmus. Genetische Algorithmen eignen sich besonders gut für komplexe kombinatorische Probleme wie das Order Picking, da sie in der Lage sind, aus einer Vielzahl möglicher Auftragskombinationen die effizienteste Lösung zu evolvieren.

### 2.1.3.2 Schwarmintelligenz in der Routenplanung

Ein weiterer vielversprechender Ansatz stammt aus der Bionik. Gupta et al. (Gupta et al., 2012) analysierten Routing-Protokolle basierend auf der Ameisenkolonie-Optimierung (Ant Colony Optimization, ACO). Obwohl ursprünglich für Netzwerke entwickelt, lässt sich das Prinzip der Pheromonspur auf die Wegfindung in dynamischen Lagerumgebungen übertragen, um Staus zu vermeiden und kürzeste Wege in Echtzeit zu identifizieren.

Algorithmus	Methode	Zielsetzung	Quelle
<b>Genetic Algorithm</b>	Evolutionäre	Optimierung von Order	(Mutingi &
	Suche	Batching Gruppen	Mbohwa, 2016)
<b>Cluster-Picking</b>	Heuristik	Gleichzeitige Bearbeitung	(Aboelfotoh et
		mehrerer Aufträge	al., 2019)
<b>Ant Colony Opt.</b>	Schwarmintelligenz	Dynamische Wegfindung	(Gupta et al.,
		und Routing	2012)
<b>Task-Tech Fit</b>	Strukturgleichungsmodell	Anpassung der Logistik	(Ramdani et
		an Auftragskomplexität	al., 2025)

*Tabelle 2: Vergleich algorithmischer Optimierungsansätze.*

Die Analyse in Tabelle 2 zeigt, dass mathematische Optimierungsmethoden (wie genetische Algorithmen) oft überlegene Ergebnisse gegenüber einfachen Heuristiken liefern, jedoch eine höhere Komplexität in der Implementierung aufweisen. Ramdani et al. (Ramdani et al., 2025) betonen in diesem Zusammenhang die Wichtigkeit des “Task-Technology Fit”, also der Passung zwischen der Komplexität der Kundenaufträge und der Leistungsfähigkeit des Logistiksystems.

### 2.1.4 Nachhaltigkeit und regulatorische Rahmenbedingungen

Die Zukunftsfähigkeit eines Lagers wird nicht nur durch Effizienz, sondern zunehmend durch ökologische und regulatorische Faktoren bestimmt. Van LUU (Van LUU, 2021) er-

forscht Green Logistics im Kontext der Kreislaufwirtschaft und betont, dass Lagerprozesse so gestaltet sein müssen, dass sie Rückführungslogistik und Ressourcenschonung unterstützen. Tan (Tan, 2021) unterstreicht dies mit dem Konzept der “Zero Waste”-Strategien, die auch in der Lagerhaltung durch Reduktion von Verpackungsmüll und Energieverbrauch Anwendung finden müssen.

Darüber hinaus schaffen gesetzliche Vorgaben neue Rahmenbedingungen. Mardenli et al. (Mardenli et al., 2025) untersuchen die Auswirkungen des deutschen Lieferkettensorgfaltspflichtengesetzes (LkSG). Auch wenn der Fokus oft auf der Beschaffung liegt, hat die interne Logistik die Aufgabe, Transparenz und Rückverfolgbarkeit der Warenflüsse zu gewährleisten, um Compliance-Anforderungen zu erfüllen.

### 2.1.5 Identifikation der Forschungslücke

Die Literaturrecherche zeigt ein breites Spektrum an Lösungen für allgemeine Lageroptimierungen und E-Commerce-Fulfillment-Center (Jantapoon, 2025)(Ramdani et al., 2025). Es existieren detaillierte Arbeiten zu Algorithmen für das Order Batching (Aboelfotoh et al., 2019)(Mutingi & Mbohwa, 2016) und technologischen Innovationen wie AR (Tang & Liu, 2021).

Dennoch lassen sich spezifische Forschungslücken identifizieren, die für den vorliegenden Fall eines Kabelherstellers relevant sind: 1. **Spezifität der Güterstruktur:** Die meisten Studien fokussieren auf homogene Stückgüter im Handel. Die Kombination aus Kleinteilen (z. B. Stecker, Hülsen) und schwer handhabbaren Kabeltrommeln oder Meterware in einem integrierten Produktionslager wird in der Literatur zu “Smart Warehousing” (Yusupov & Umetbayev, 2022) seltener adressiert. 2. **Skalierbarkeit für KMU:** Hochkomplexe Lösungen wie “Lights-Out Logistics” (Yıldız & Çiğdem, 2022) sind oft kapitalintensiv. Es fehlt an adaptierten Konzepten für mittelständische Industrieunternehmen, die eine schrittweise Transformation anstreben. 3. **Integration von Nachhaltigkeit und Effizienz:** Während Green Logistics (Van LUU, 2021) theoretisch diskutiert wird, fehlen oft konkrete

Fallstudien zur operativen Umsetzung von Zero-Waste-Strategien (Tan, 2021) in bestehenden Kleinteilelagern der verarbeitenden Industrie.

Diese Arbeit adressiert diese Lücken, indem sie die theoretischen Konzepte der Lageroptimierung und Digitalisierung auf die spezifischen Restriktionen und Anforderungen eines Kabelherstellers anwendet und dabei sowohl Effizienz als auch Zukunftsfähigkeit (Nachhaltigkeit) berücksichtigt.

## **2.2 Methodik**

Die vorliegende Arbeit verfolgt einen methodischen Ansatz, der auf einer narrativen Literaturübersicht basiert, um theoretische Konzepte der Lageroptimierung auf die spezifischen Anforderungen eines mittelständischen Kabelherstellers zu übertragen. Ziel ist die Entwicklung eines integrierten Optimierungskonzepts, das sowohl Effizienzsteigerungen als auch Nachhaltigkeitsaspekte berücksichtigt. Dieser Abschnitt beschreibt das Forschungsdesign, die Datengrundlage der Literaturrecherche sowie den analytischen Rahmen zur Bewertung der identifizierten Technologien und Prozesse.

### **2.2.1 Forschungsdesign und Literaturidentifikation**

Um die in Abschnitt 2.1 identifizierten Forschungslücken - insbesondere die fehlende Integration von Nachhaltigkeit in Kleinteilelagern der verarbeitenden Industrie - zu schließen, wurde eine umfassende narrative Literaturanalyse durchgeführt. Im Gegensatz zu einer systematischen Übersichtsarbeit (z. B. Nach PRISMA) ermöglicht dieser Ansatz eine breitere Kontextualisierung heterogener Quellen, was für die interdisziplinäre Verknüpfung von Logistik, Informatik und Nachhaltigkeitsmanagement essenziell ist.

Die Literaturrecherche konzentrierte sich auf akademische Datenbanken wie Semantic Scholar, CrossRef und arXiv. Dabei wurden Publikationen aus dem Zeitraum von 2007 bis 2025 berücksichtigt, um sowohl fundamentale Lagerprinzipien (Sharp, 2007) als auch aktuelle

technologische Entwicklungen im Bereich “Smart Warehousing” (Yusupov & Umetbayev, 2022)(Jantapoon, 2025) zu erfassen. Die Selektion der Quellen erfolgte anhand ihrer Relevanz für drei Kernbereiche: operative Lagerprozesse (z. B. Kommissionierung, Batching), digitale Transformationstechnologien und ökologische Nachhaltigkeit in der Logistik.

Besonderes Augenmerk lag auf der Identifikation von Methoden, die für kleine und mittlere Unternehmen (KMU) skalierbar sind. Während Konzepte wie “Lights-Out Logistics” (Yıldız & Çiğdem, 2022) theoretisch maximale Effizienz versprechen, wurde in der Analyse der Fokus auf adaptierbare Lösungen gelegt, die eine schrittweise Transformation ermöglichen.

### 2.2.2 Analytischer Rahmen zur Prozessbewertung

Die Bewertung und Auswahl geeigneter Optimierungsstrategien erfolgt anhand eines mehrdimensionalen Analyserahmens. Dieser Rahmen synthetisiert etablierte Methoden der Lagerplanung mit modernen algorithmischen Ansätzen. Tabelle 1 fasst die untersuchten methodischen Ansätze zusammen, die als Grundlage für die spätere Konzeptentwicklung dienen.

Methodischer Ansatz	Kernfokus	Relevanz für KMU	Quellen
5S-Methodik	Physische Ordnung, Reduktion von Suchzeiten	Hoch (geringe Investition)	(Deokar, 2017)
Order Batching	Algorithmische Bündelung von Aufträgen	Mittel (Software nötig)	(Aboelfotoh et al., 2019)(Mutingi & Mbohwa, 2016)

Methodischer Ansatz	Kernfokus	Relevanz für KMU	Quellen
Smart Warehousing	IoT, Automatisierung, Echtzeitdaten	Mittel bis Hoch (skalierbar)	(Yusupov & Umetbayev, 2022)(Jan-tapoon, 2025)
Simulation	Layout-Optimierung, Prozessvalidierung	Mittel (Planungsaufwand)	(Zhang, 2024)(Hamberg, 2011)
Green Logistics	Energieeffizienz, Abfallvermeidung	Hoch (regulatorisch)	(Van LUU, 2021)(Tan, 2021)

*Tabelle 1: Übersicht der methodischen Ansätze zur Lageroptimierung. Quelle: Eigene Darstellung basierend auf den angegebenen Zitationen.*

### *Physische und Organisatorische Optimierung*

Als Basis für jede technologische Erweiterung dient die Analyse physischer Lagerstrukturen. Hierbei wird auf die 5S-Methodik (Sortieren, Systematisieren, Säubern, Standardisieren, Selbstdisziplin) zurückgegriffen, die sich als effektives Instrument zur sofortigen Effizienzsteigerung bei geringem Kapitaleinsatz erwiesen hat (Deokar, 2017). Für die spezifische Herausforderung der Layout-Planung in einem Kleinteilelager werden Ansätze der systematischen Layout-Planung (SLP) und Simulation herangezogen (Zhang, 2024). Diese Methoden ermöglichen es, Engpässe in der Intralogistik zu identifizieren, bevor physische Änderungen vorgenommen werden.

Ein zentraler Bestandteil der Methodik ist die Untersuchung algorithmischer Lösungsansätze für das Kommissionierproblem. Die Literatur zeigt, dass die Effizienz signifikant durch optimiertes “Order Batching” gesteigert werden kann (Aboelfotoh et al., 2019). Dabei werden verschiedene Aufträge zu einem Pick-Durchlauf zusammengefasst. Für die vorliegende Arbeit werden Erkenntnisse zu hybriden Gruppierungs-genetischen Algorithmen (HGGA) analysiert (Mutingi & Mbohwa, 2016). Diese Algorithmen bieten das Potenzial, Wegzeiten drastisch zu reduzieren, was direkt auf die in Abschnitt 2.1 genannte Problematik der ineffizienten Laufwege im Kleinteilelager einzahlt. Ergänzend werden Routing-Protokolle, die auf Ameisenkolonie-Optimierung (ACO) basieren, als Vergleichsmaßstab herangezogen, da diese in dynamischen Netzwerken (MANETs) erfolgreich eingesetzt wurden und Prinzipien auf dynamische Lagerumgebungen übertragbar sind (Gupta et al., 2012).

### **2.2.3 Integration von Nachhaltigkeit und Compliance**

Ein wesentliches methodisches Alleinstellungsmerkmal dieser Arbeit ist die Integration von Nachhaltigkeitsanforderungen als harte Restriktion und nicht nur als sekundäres Ziel. Basierend auf den Untersuchungen von Mardenli et al. (Mardenli et al., 2025) zum Lieferkettensorgfaltspflichtengesetz (LkSG) wird die interne Logistik nicht isoliert, sondern als Teil einer transparenten Lieferkette betrachtet.

Die methodische Bewertung der Nachhaltigkeit erfolgt durch die Adaption von “Zero Waste”-Strategien auf Lagerprozesse. Tan (Tan, 2021) definiert hierfür Rahmenbedingungen, die über reines Recycling hinausgehen und die Vermeidung von Verschwendung in Prozessen fokussieren. Dies wird mit dem Konzept der “Green Logistics” verknüpft, welches Geschäftsprozessmanagement in den Kontext der Kreislaufwirtschaft stellt (Van LUU, 2021).

Konkret bedeutet dies für die Methodik: Jede technische Optimierungsmaßnahme (z. B. Einführung von Augmented Reality zur Kommissionierung (Tang & Liu, 2021)) wird nicht

nur hinsichtlich ihrer ökonomischen Effizienz (ROI, Pick-Rate), sondern auch hinsichtlich ihrer ökologischen Auswirkung (Energieverbrauch, Fehlerreduktion zur Vermeidung von Retouren) bewertet.

### 2.2.4 Technologische Auswahlkriterien

Um die Lücke der Skalierbarkeit für KMU zu schließen, werden Technologien anhand ihrer Implementierungshürden klassifiziert. Hamberg (Hamberg, 2011) liefert hierfür Modelle zur Entwicklung neuer Lagerkonzepte, die eine strukturierte Entscheidungsfindung unterstützen.

Die Analyse unterscheidet zwischen: 1. **Assistenzsystemen:** Technologien wie Augmented Reality (AR) über HoloLens, die den Menschen unterstützen, aber nicht ersetzen (Tang & Liu, 2021). Diese werden auf ihre Eignung für komplexe, heterogene Güterstrukturen (Kabel vs. Kleinteile) geprüft. 2. **Vollautomatisierung:** Ansätze wie “Lights-Out Logistics” (Yıldız & Çiğdem, 2022), bei denen der menschliche Eingriff minimiert wird. Diese werden kritisch auf ihre Kosten-Nutzen-Relation für mittelständische Strukturen hinterfragt. 3. **Datenintegration:** Die Rolle von Big Data und Data Warehousing (Krishnan, 2013) wird als fundamentale Voraussetzung für jede Optimierung betrachtet. Ohne eine saubere Datenbasis ist weder ein effektives Order Batching noch eine Compliance-gerechte Rückverfolgbarkeit möglich.

### 2.2.5 Grenzen der Methodik

Es muss einschränkend erwähnt werden, dass es sich bei dieser Arbeit um eine theoretische Analyse und Konzeption handelt. Eine empirische Erhebung von Echtzeitdaten im laufenden Betrieb des Kabelherstellers oder eine physische Implementierung der vorgeschlagenen Algorithmen erfolgt im Rahmen dieser Arbeit nicht. Stattdessen werden Validierungsmethoden aus der Literatur, wie Simulationsstudien (Zhang, 2024) und Fallanalysen aus dem E-Commerce-Bereich (Jantapoon, 2025)(Ramdani et al., 2025), herange-



zogen, um die prognostizierten Effekte zu plausibilisieren. Zudem ist die Übertragbarkeit von Erkenntnissen aus dem reinen E-Commerce-Fulfillment auf die integrierte Produktionslogistik eines Industrieunternehmens mit Unsicherheiten behaftet, die durch konservative Schätzungen in der Potenzialanalyse adressiert werden.

## 2.3 Analyse und Ergebnisse

Die in diesem Kapitel präsentierten Ergebnisse basieren auf einer synthetischen Analyse der in Abschnitt 2.2 beschriebenen methodischen Ansätze. Da es sich um eine konzeptionelle Arbeit zur Optimierung eines Kleinteilelagers bei einem Kabelhersteller handelt, werden die Resultate aus vergleichbaren Fallstudien, Simulationen und empirischen Erhebungen der ausgewählten Literatur abgeleitet. Die Analyse konzentriert sich auf die Quantifizierung von Effizienzsteigerungen durch technologische Assistenzsysteme, algorithmische Wegoptimierung und organisatorische Prozessverbesserungen.

### 2.3.1 Potenzialanalyse technologischer Assistenzsysteme

Die Untersuchung der technologischen Optionen zeigt eine deutliche Differenzierung zwischen vollautomatisierten Lösungen und Assistenzsystemen, die den Menschen im Prozess belassen (“Human-in-the-Loop”).

#### *2.3.1.1 Augmented Reality im Kommissionierprozess*

Die Analyse der Studie von Tang und Liu (Tang & Liu, 2021) zur Implementierung von Hololens-basierten Augmented Reality (AR) Technologien liefert signifikante Erkenntnisse für nicht-automatisierte Lagerumgebungen. Im Gegensatz zu klassischen Pick-by-Paper- oder Pick-by-Light-Systemen ermöglicht AR eine direkte visuelle Überlagerung von Informationen im Sichtfeld des Mitarbeiters.

Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass AR-Systeme insbesondere bei heterogenen Güterstrukturen - wie sie bei einem Kabelhersteller mit einer Mischung aus Kleinteilen (Stecker, Hülsen) und Meterware vorliegen - Vorteile bieten. Die visuelle Hervorhebung des Ziel-Lagerfachs reduziert die Suchzeit drastisch. Tang und Liu (Tang & Liu, 2021) konnten zeigen, dass die Fehlerrate durch die visuelle Verifikation signifikant gesenkt wird. Dies ist besonders relevant für die Kommissionierung von Kleinteilen, bei denen Verwechslungen optisch ähnlicher Komponenten (z. B. Unterschiedliche Aderendhülsen) häufige Fehlerquellen darstellen.

#### *2.3.1.2 Vergleich: Smart Warehouse vs. Lights-Out Logistics*

Im Kontrast zu AR-Lösungen stehen Ansätze der Vollautomatisierung. Yusupov und Umetbayev (Yusupov & Umetbayev, 2022) analysieren das Konzept des “Smart Warehouse”, in dem Robotik und Automatisierung die Geschwindigkeit der Auftragsabwicklung und den Lagerumschlag vervielfachen. Die Analyse zeigt, dass solche Systeme zwar die höchste Prozessgeschwindigkeit erreichen, jedoch hohe initiale Investitionskosten (CAPEX) erfordern.

Noch radikaler ist der Ansatz der “Lights-Out Logistics”, wie von Yıldız und Çiğdem (Yıldız & Çiğdem, 2022) beschrieben. Hierbei operiert das Lager vollständig autonom ohne menschliches Eingreifen, was den Betrieb rund um die Uhr (24/7) ohne Beleuchtung oder Klimatisierung für Mitarbeiter ermöglicht. Die Analyse der Literatur zeigt jedoch, dass die Flexibilität solcher Systeme bei stark variierenden Produktgeometrien (z. B. Starre Kabeltrommeln vs. Lose Schüttgut-Kleinteile) limitiert sein kann.

Tabelle 1 fasst die analysierten Leistungsmerkmale der verschiedenen Technologiestufen basierend auf den Literaturdaten zusammen.

Technologie	Primärer Vorteil	Herausforderung	Eignung Kleinteile	Quelle
Manuell (Basis)	Hohe Flexibilität	Hohe Fehlerrate	Mittel	(Sharp, 2007)
AR (Hololens)	Reduzierte Suchzeit	Hardware-Kosten	Hoch	(Tang & Liu, 2021)
Smart Warehouse	Hoher Durchsatz	Integration	Hoch	(Yusupov & Umetbayev, 2022)
Lights-Out	24/7 Betrieb	Geringe Flexibilität	Niedrig (bei Mix)	(Yıldız & Çiğdem, 2022)

*Tabelle 1: Vergleichende Analyse der Lagertechnologien. Quelle: Eigene Darstellung basierend auf (Tang & Liu, 2021), (Yusupov & Umetbayev, 2022) und (Yıldız & Çiğdem, 2022).*

Die Synthese dieser Ergebnisse legt nahe, dass für den spezifischen Anwendungsfall eines mittelständischen Kabelherstellers eine hybride Lösung (AR-Unterstützung) das günstigste Kosten-Nutzen-Verhältnis bietet, da die Flexibilität für unterschiedliche Packstücke erhalten bleibt, während Suchzeiten minimiert werden.

### 2.3.2 Algorithmische Optimierung der Lagerprozesse

Neben der Hardware-Ebene zeigt die Analyse der Literatur, dass signifikante Effizienzgewinne durch die mathematische Optimierung von Laufwegen und Auftragsbündelung (Batching) erzielt werden können.

### *2.3.2.1 Order Batching und Cluster-Picking*

Die Untersuchung von Aboelfotoh et al. (Aboelfotoh et al., 2019) zum Thema Order Batching in Kombination mit Cluster-Picking zeigt, dass die Zusammenfassung mehrerer Kundenaufträge zu einem Pick-Lauf die Wegstrecken erheblich reduziert. Für das Kleinteilelager bedeutet dies, dass ein Mitarbeiter in einem Durchgang Materialien für mehrere Fertigungsaufträge entnimmt. Die Ergebnisse der Studie belegen, dass die Effizienz der Kommissionierung stark von der gewählten Batching-Strategie abhängt. Statische Strategien (First-Come-First-Served) schneiden in der Analyse deutlich schlechter ab als dynamische Algorithmen, die Aufträge basierend auf der Lagerortnähe bündeln.

### *2.3.2.2 Heuristische Optimierungsverfahren*

Mutingi und Mbohwa (Mutingi & Mbohwa, 2016) demonstrieren die Leistungsfähigkeit von genetischen Algorithmen (Hybrid Grouping Genetic Algorithm) zur Lösung des Order-Batching-Problems (OBP). Die Analyse ihrer Ergebnisse zeigt, dass diese metaheuristischen Verfahren in der Lage sind, Lösungen zu finden, die manuellen Planungen weit überlegen sind. Der Algorithmus optimiert dabei zwei Zielfunktionen simultan: die Minimierung der gesamten Reisezeit und die Maximierung der Auslastung der Kommissionierwagen.

Ähnliche Ergebnisse liefern Gupta et al. (Gupta et al., 2012) bei der Anwendung von Ameisenalgorithmen (Ant Colony Optimization, ACO). Obwohl ihre Studie primär Routing-Protokolle (MANET) adressiert, lässt sich das Prinzip der Pheromon-basierten Pfadfindung auf die Lagerlogistik übertragen. Die Analyse zeigt, dass dezentrale Steuerungsmechanismen, bei denen "erfolgreiche" Wege verstärkt werden, besonders in dynamischen Umgebungen mit schwankenden Auftragsstrukturen strong funktionieren.

Die mathematische Formulierung der Zielfunktion für solche Optimierungsprobleme lässt sich allgemein beschreiben als die Minimierung der Gesamtwegstrecke  $D$ :

$$D = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N d_{ij} x_{ij}$$

wobei  $d_{ij}$  die Distanz zwischen Lagerort  $i$  und  $j$  darstellt und  $x_{ij}$  eine binäre Entscheidungsvariable ist, ob der Weg von  $i$  nach  $j$  beschriftet wird. Die Literatur (Mutingi & Mbohwa, 2016) zeigt, dass moderne Algorithmen diese Distanz  $D$  um bis zu 30% gegenüber Standard-Heuristiken reduzieren können.

### 2.3.2.3 Simulationsgestützte Layout-Optimierung

Die Validierung solcher Optimierungen erfolgt in der Literatur häufig durch Simulationen. Zhang (Zhang, 2024) nutzt die Simulationssoftware Flexsim, um Lagerlayouts basierend auf dem Systematic Layout Planning (SLP) zu optimieren. Die Ergebnisse dieser Simulation zeigen, dass nicht nur die Laufwege, sondern auch die Anordnung der Regale einen kritischen Einfluss auf den Durchsatz haben. Eine ABC-Klassifizierung, bei der Schnelldreher (A-Artikel) zentral platziert werden, führte in der Simulation zu signifikanten Zeitersparnissen.

Optimierungsansatz	Methode	Erwarteter Effekt	Relevanz Kabel	Quelle
Order Batching	Cluster-Picking	Wegreduktion	Hoch (Kleinteile)	(Aboelfotoh et al., 2019)
Pfad-Optimierung	Genetische Alg.	Reisezeit-Minimierung	Mittel	(Mutingi & Mbohwa, 2016)
Layout-Design	Simulation (Flexsim)	Durchsatzsteigerung	Hoch	(Zhang, 2024)

Optimierungsansatz	Methode	Erwarteter Effekt	Relevanz Kabel	Quelle
Routing	Ant	Dynamische	Mittel	(Gupta et al., 2012)
	Colony	Anpassung		
	Opt.			

*Tabelle 2: Analyse algorithmischer Optimierungsansätze. Quelle: Eigene Darstellung basierend auf (Aboelfotoh et al., 2019), (Mutingi & Mbohwa, 2016) und (Zhang, 2024).*

### 2.3.3 Datenintegration und Prozessorganisation

Die technologische und algorithmische Optimierung setzt eine fundamentale Basis voraus: Datenqualität und Prozessdisziplin.

#### 2.3.3.1 Big Data und Data Warehousing

Krishnan (Krishnan, 2013) identifiziert die Integration von Big Data als kritischen Erfolgsfaktor. Die Analyse zeigt, dass isolierte Optimierungsmaßnahmen (z. B. Nur neue Regale) verpuffen, wenn sie nicht durch ein integriertes Datenmanagement gestützt werden. Für den Kabelhersteller bedeutet dies, dass Bestandsdaten, Auftragsdaten und Prozessdaten in einem Data Warehouse konsolidiert werden müssen. Nur so können die in Abschnitt 2.3.2 beschriebenen Algorithmen mit validen Echtzeitdaten gefüttert werden. Jantapoon (Jantapoon, 2025) bestätigt in einer empirischen Studie mittels Machine Learning-gestützter Strukturgleichungsmodellierung (SEM), dass “Smart Warehousing” einen direkten positiven Einfluss auf die Leistung der Lieferkette hat.

#### 2.3.3.2 Lean Management und 5S

Auf der operativen Ebene zeigt die Untersuchung von Deokar (Deokar, 2017), dass Low-Tech-Methoden wie 5S (Sortieren, Systematisieren, Säubern, Standardisieren, Selbstdisziplin) eine notwendige Ergänzung zu High-Tech-Lösungen sind. Die Ergebnisse von De-

okar belegen, dass die Anwendung von 5S die Suchzeiten für Dokumente und Werkzeuge drastisch reduziert (“Quick Retrieval”). Übertragen auf das Kleinteilelager bedeutet dies, dass klare Kennzeichnungen und definierte Lagerplätze die Voraussetzung für den Einsatz von AR-Brillen oder Robotern sind. Ohne die durch 5S geschaffene physische Ordnung würde auch das beste WMS fehlerhafte Anweisungen generieren.

Ramdani et al. (Ramdani et al., 2025) ergänzen diese Sichtweise durch die Analyse der Auftragskomplexität. Ihre Studie zu E-Commerce-Fulfillment-Centern zeigt, dass die Fähigkeit des Logistiksystems (Logistics System Capability), komplexe Aufträge zu bewältigen, maßgeblich von der Passung zwischen Aufgabe und Technologie (Task-Technology Fit) abhängt. Für den Kabelhersteller impliziert dies, dass die Technologieauswahl (z. B. AR vs. Handscanner) exakt auf die Komplexität der Kleinteile-Kommissionierung abgestimmt sein muss.

### **2.3.4 Nachhaltigkeit und Zukunftsfähigkeit**

Abschließend betrachtet die Analyse die ökologische Dimension der Lageroptimierung als Teil der Zukunftsfähigkeit.

#### *2.3.4.1 Green Logistics und Circular Economy*

Van LUU (Van LUU, 2021) untersucht die Rolle von Green Logistics im Kontext der Kreislaufwirtschaft (Circular Economy). Die Ergebnisse zeigen, dass optimierte Lagerprozesse nicht nur Kosten sparen, sondern auch den CO<sub>2</sub>-Fußabdruck reduzieren, beispielsweise durch energieeffiziente Beleuchtung oder optimierte Routen (weniger Energieverbrauch der Flurförderzeuge). Tan (Tan, 2021) betont in der Analyse von “Zero Waste”-Strategien, dass die Abfallvermeidung bereits im Lager beginnt (z. B. Durch Reduktion von Verpackungsmaterial bei der Umpackung von Kleinteilen).

Mardenli et al. (Mardenli et al., 2025) weisen zudem auf die steigende Relevanz von Compliance-Anforderungen hin, wie dem deutschen Lieferkettensorgfaltspflichtengesetz

(LkSG). Ein zukunftsfähiges Lager muss in der Lage sein, die Herkunft und den Verbleib jedes Bauteils lückenlos zu dokumentieren. Die Analyse der Experteninterviews in dieser Studie unterstreicht, dass Transparenz in der Lieferkette ohne digitale Datenerfassung im Lager nicht realisierbar ist.

Dimension	Maßnahme	Effekt	Quelle
Ökologie	Zero Waste Strategie	Abfallreduktion	(Tan, 2021)
Energie	Routenoptimierung	Geringerer Stromverbrauch	(Van LUU, 2021)
Compliance	Digitale Rückverfolgbarkeit	Erfüllung LkSG	(Mardenli et al., 2025)

*Tabelle 3: Analyse der Nachhaltigkeitsaspekte. Quelle: Eigene Darstellung basierend auf (Mardenli et al., 2025), (Van LUU, 2021) und (Tan, 2021).*

Zusammenfassend zeigt die Analyse der Literatur, dass die Zukunftsfähigkeit des Kleinteilelagers nicht durch eine einzelne “Wunderwaffe” erreicht wird, sondern durch die Synergie aus intelligenter Datennutzung (Krishnan, 2013), algorithmischer Prozesssteuerung (Mutingi & Mbohwa, 2016) und angemessener technologischer Unterstützung (Tang & Liu, 2021), flankiert von robusten Lean-Prozessen (Deokar, 2017).

## 2.4 Diskussion

Die in Abschnitt 2.3 synthetisierten Ergebnisse der Literaturanalyse liefern signifikante Erkenntnisse zur Zukunftsfähigkeit von Kleinteilelagern, die weit über rein operative Verbesserungen hinausgehen. Während Abschnitt 2.1 die historischen Grundlagen des Lagerdesigns und der Prozessoptimierung etablierte, verdeutlicht die Diskussion der Ergebnisse eine Verschiebung der Paradigmen: Von der statischen Kostenminimierung hin zu einer dynamischen, nachhaltigkeitsorientierten und technologisch integrierten Lagerlogistik. Im Folgenden werden diese Erkenntnisse interpretiert, in den Kontext des theoretischen



Rahmens (Abschnitt 2.1) eingeordnet und hinsichtlich ihrer Implikationen für Forschung und Praxis bewertet.

#### *2.4.1 Transformation vom statischen Layout zur dynamischen Intelligenz*

Ein zentraler Befund der Analyse ist die Evolution der Lageroptimierungsmethoden. Wie in Abschnitt 2.1 diskutiert, legten Autoren wie Sharp (Sharp, 2007) den Fokus primär auf physische Layout-Entscheidungen und Raumnutzung als statische Größen. Die in Abschnitt 2.3 präsentierten Ergebnisse zeigen jedoch, dass moderne Ansätze diese statische Sichtweise durch dynamische, datengetriebene Modelle ersetzen.

**2.4.1.1 Algorithmische Prozesssteuerung vs. Heuristiken** Der Vergleich der Literatur zeigt, dass traditionelle Heuristiken zunehmend durch komplexe Algorithmen substituiert werden. Während frühere Ansätze oft auf einfachen Einlagerungsregeln basierten, demonstrieren aktuelle Studien wie die von Mutingi und Mbohwa (Mutingi & Mbohwa, 2016), dass genetische Algorithmen und hybride Optimierungsmodelle eine signifikant höhere Effizienz bei der Kommissionierung ermöglichen. Dies bestätigt und erweitert die in Abschnitt 2.1.1 diskutierten Grundlagen des Prozessmanagements. Wo Ackerman (Ackerman, 1990) die Notwendigkeit von Lagerverwaltungssystemen (WMS) betonte, gehen heutige Forschungen einen Schritt weiter: Jantapoon (Jantapoon, 2025) zeigt auf, dass “Smart Warehousing” durch Machine Learning nicht nur verwaltet, sondern proaktiv optimiert.

**2.4.1.2 Simulation als Planungsinstrument** Ein weiterer wesentlicher Unterschied zum in Abschnitt 2.1 dargestellten theoretischen Rahmen ist die Rolle der Simulation. Zhang (Zhang, 2024) belegt, dass die Optimierung von Regallayouts heute nicht mehr nur auf Erfahrungswerten (wie bei Sharp (Sharp, 2007)), sondern auf systematischen Simulationsmodellen (z. B. Flexsim) basiert. Dies adressiert die Forschungslücke der fehlenden Dynamik in klassischen Modellen, indem es ermöglicht, Szenarien virtuell zu testen, bevor physische Änderungen im Kleinteilelager vorgenommen werden.

### *2.4.2 Integration von Nachhaltigkeit und Compliance*

Die vielleicht bedeutendste Erweiterung des in Abschnitt 2.1 skizzierten Forschungsstandes ist die Integration ökologischer Dimensionen in die Lagerlogistik. Während traditionelle Lean-Management-Ansätze, wie von Deokar (Deokar, 2017) beschrieben, primär auf die Eliminierung von Zeitverschwendung abzielten, fordert die aktuelle Literatur eine Ausweitung des “Waste”-Begriffs auf ökologische Ressourcen.

**2.4.2.1 Von Lean zu Green Logistics** Die Ergebnisse aus Abschnitt 2.3 verdeutlichen, dass Lean-Prinzipien (z. B. 5S) eine natürliche Synergie mit Nachhaltigkeitszielen bilden. Tan (Tan, 2021) argumentiert im Kontext von “Zero Waste”-Strategien, dass Abfallvermeidung bereits im Lagerdesign beginnen muss. Dies korrespondiert mit den Erkenntnissen von Van LUU (Van LUU, 2021), der aufzeigt, dass optimierte Prozesse in der Kreislaufwirtschaft (Circular Economy) direkt zur Reduktion des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks beitragen. Im Vergleich zur reinen Effizienzbetrachtung in Abschnitt 2.1 wird deutlich, dass Zukunftsfähigkeit heute untrennbar mit ökologischer Verantwortung verknüpft ist. Ein zukunftsfähiges Kleinteilelager optimiert nicht nur Pick-Raten, sondern minimiert auch Verpackungsmüll und Energieverbrauch.

**2.4.2.2 Regulatorische Anforderungen als Treiber** Ein neuer Aspekt, der in den klassischen Theorien (Abschnitt 2.1) kaum Berücksichtigung fand, ist der regulatorische Druck. Mardenli et al. (Mardenli et al., 2025) weisen nach, dass Gesetze wie das Lieferkettensorgfaltspflichtengesetz (LkSG) die Lagerlogistik zwingen, eine lückenlose Transparenz zu gewährleisten. Dies transformiert das Lager von einem reinen Kostenfaktor zu einem kritischen Compliance-Knotenpunkt. Die Fähigkeit zur digitalen Rückverfolgbarkeit wird somit zu einer harten Anforderung an die Zukunftsfähigkeit, die ohne die in Abschnitt 2.3 diskutierten Technologien (Big Data, Smart Warehousing) nicht erfüllbar ist.

### 2.4.3 Synthese der Optimierungsansätze

Die Diskussion zeigt, dass keine Einzelmaßnahme ausreicht, um ein Kleinteilelager zukunftsfähig zu machen. Vielmehr ist eine Integration verschiedener Dimensionen notwendig. Tabelle 4 fasst die Verschiebung der Schwerpunkte zusammen, die sich aus dem Vergleich der traditionellen Literatur (Abschnitt 2.1) mit den aktuellen Forschungsergebnissen (Abschnitt 2.3) ergibt.

	Traditioneller Ansatz (vgl. DimensionAbschn. 2.1)	Zukunftsfähiger Ansatz (Ergebnisse Abschn. 2.3)	Primäre Treiber
<b>Planung</b>	Statisches Layout & Raumnutzung (Sharp, 2007)	Dynamische Simulation & Flexibilität (Zhang, 2024)	Effizienz & Adaptivität
<b>Steuerung</b>	Manuelle Heuristiken / Basis-WMS (Ackerman, 1990)	KI-gestützte Algorithmen & Smart Warehousing (Jantapoon, 2025)	Geschwindigkeit & Präzision
<b>Ökologie</b>	Fokus auf Kostenreduktion	Green Logistics & Zero Waste (Van LUU, 2021)(Tan, 2021)	Nachhaltigkeit & Image
<b>Compliance</b>	Interne Dokumentation	Digitale Transparenz & LkSG-Konformität (Mardenli et al., 2025)	Gesetzgebung & Risiko
<b>Technologie</b>	Unterstützendes Werkzeug	Enabler für Lights-Out Logistics (Yıldız & Çiğdem, 2022)	Automatisierung

*Tabelle 4: Paradigmenwechsel in der Lageroptimierung. Quelle: Eigene Synthese basierend auf der analysierten Literatur.*

Die Tabelle verdeutlicht, dass die moderne Lagerlogistik eine höhere Komplexität bewältigen muss. Die Einführung von Technologien wie Augmented Reality, wie von Tang und Liu (Tang & Liu, 2021) untersucht, dient dabei als Brückentechnologie, um menschliche Arbeitskraft in zunehmend digitalisierten Umgebungen zu unterstützen, ohne sofortige Vollautomatisierung zu erzwingen.

#### *2.4.4 Implikationen und Limitationen*

Die Analyse der Literatur impliziert für die Praxis, dass Investitionen in Hardware (Regale, Fördertechnik) stets von Investitionen in Software und Datenkompetenz begleitet werden müssen. Krishnan (Krishnan, 2013) betont die Rolle von Big Data Warehousing als Fundament für Entscheidungen. Ohne saubere Datenbasis bleiben Algorithmen wie die von Mutingi und Mbohwa (Mutingi & Mbohwa, 2016) wirkungslos.

Gleichzeitig zeigen Studien wie die von Ramdani et al. (Ramdani et al., 2025), dass der “Task-Technology Fit” entscheidend ist. Nicht jede Technologie ist für jedes Lager geeignet; die Komplexität der Aufträge muss zur Leistungsfähigkeit des Logistiksystems passen. Eine Limitation der aktuellen Forschung liegt darin, dass viele Studien (z. B. (Gupta et al., 2012) zu Ameisenalgorithmen) oft theoretischer Natur sind oder auf Simulationen basieren. Die Übertragbarkeit auf spezifische Restriktionen eines realen Kabelherstellers mit physisch schweren oder sperrigen Kleinteilen erfordert daher eine sorgfältige Adaption der theoretischen Modelle. Zudem bleibt die Herausforderung bestehen, die hohen Investitionskosten für “Lights-Out Logistics” (Yıldız & Çiğdem, 2022) in mittelständischen Strukturen ökonomisch zu rechtfertigen.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die in Abschnitt 2.1 identifizierten Forschungslücken durch die aktuellen Erkenntnisse teilweise geschlossen werden konnten, insbesondere im Hinblick auf die technologische Machbarkeit. Die Lücke der ganzheitlichen Integration von Nachhaltigkeit in die operativen Steuerungsalgorithmen bleibt jedoch ein Feld, das weiterer praktischer Umsetzung bedarf.

### **3. Fazit**

Die vorliegende Arbeit hat sich intensiv mit der Optimierung und der Sicherstellung der Zukunftsfähigkeit eines Kleinteilelagers in der kabelverarbeitenden Industrie auseinandergesetzt. Durch die Synthese von etablierten theoretischen Grundlagen und modernen technologischen Ansätzen konnte aufgezeigt werden, dass eine nachhaltige Lageroptimierung nicht isoliert betrachtet werden kann, sondern als integrativer Bestandteil der gesamten Supply Chain verstanden werden muss. Die Untersuchung verdeutlicht, dass die Zukunftsfähigkeit eines Kleinteilelagers auf drei Säulen ruht: der Prozessstabilität durch Lean-Methoden, der digitalen Transformation durch intelligente Systeme und der algorithmischen Optimierung von Abläufen.

#### **3.1 Zusammenfassung der zentralen Ergebnisse**

Die Analyse der Literatur zeigt, dass traditionelle Prinzipien des Lagerdesigns, wie sie von Sharp (Sharp, 2007) definiert wurden, nach wie vor ihre Gültigkeit besitzen, jedoch zwingend um digitale Komponenten erweitert werden müssen. Die physische Raumausnutzung und die Minimierung von Handlingskosten bleiben primäre Ziele, die jedoch heute durch Simulationswerkzeuge validiert werden müssen. Zhang (Zhang, 2024) demonstriert, dass die Simulation von Regallayouts mittels systematischer Planung (SLP) und Software wie Flexsim signifikante Effizienzsteigerungen ermöglicht, bevor physische Veränderungen vorgenommen werden. Dies ist besonders für Kleinteilelager relevant, in denen eine hohe Artikelvielfalt auf begrenztem Raum verwaltet wird.

Ein wesentliches Ergebnis der Untersuchung ist die Erkenntnis, dass Automatisierung und Digitalisierung auf geordneten physischen Prozessen aufbauen müssen. Die Anwendung von 5S-Prinzipien (Sortieren, Systematisieren, Säubern, Standardisieren, Selbstdisziplin) stellt eine notwendige Vorbedingung für die Einführung komplexer Technologien dar

(Deokar, 2017). Ohne diese grundlegende Prozessdisziplin führt die Digitalisierung lediglich zur Beschleunigung ineffizienter Abläufe.

Hinsichtlich der technologischen Entwicklung identifiziert die Arbeit den Übergang zum „Smart Warehouse“ als entscheidenden Faktor für die Wettbewerbsfähigkeit. Yusupov und Umetbayev (Yusupov & Umetbayev, 2022) belegen, dass die Einführung von Robotik und intelligenten Lagersystemen die Auftragsbearbeitungsgeschwindigkeit und den Lagerumschlag vervielfachen kann. Dabei spielen Augmented Reality (AR) Technologien, wie HoloLens-basierte Kommissioniersysteme, eine Brückenfunktion. Sie ermöglichen es, in nicht-vollautomatisierten Bereichen die Fehlerrate zu senken und die Effizienz zu steigern, indem sie digitale Informationen direkt in das Sichtfeld der Mitarbeiter projizieren (Tang & Liu, 2021).

Tabelle 3.1 fasst die identifizierten Entwicklungsstufen vom traditionellen zum zukunftsfähigen Lager zusammen:

Dimension	Traditioneller Ansatz	Zukunftsfähiger Ansatz	Technologischer Treiber
Kommissionierung	Magnu- ell, papierbasiert	AR-gestützt oder vollautomatisch	HoloLens, Robotik (Tang & Liu, 2021)(Yıldız & Çiğdem, 2022)
Bestandsführung	Periodische Inventur	Echtzeit-Tracking	WMS, Big Data (Ackerman, 1990)(Krishnan, 2013)
Layout- Planung	Statisch, erfahrungsbasiert	Dynamisch, simulationsbasiert	Flexsim, SLP (Zhang, 2024)
Strategie	Kostenminimierung	Service-Level & Nachhaltigkeit	Green Logistics (Van LUU, 2021)
Prozesslogik	Fixe Routen	Algorithmische Optimierung	Ameisenalgorithmen (Gupta et al., 2012)

*Tabelle 3.1: Transformationsmatrix zur Zukunftsfähigkeit von Kleinteilelagern.*

Die Tabelle verdeutlicht den fundamentalen Wandel: Während traditionelle Ansätze auf statische Optimierung setzten, erfordert die Zukunftsfähigkeit dynamische, datengetriebene Systeme. Die Integration von Big Data in das Data Warehousing, wie von Krishnan (Krishnan, 2013) beschrieben, bildet hierfür das informationstechnische Rückgrat.

## **3.2 Implikationen für die Praxis**

Für den betrachteten Kabelhersteller ergeben sich aus diesen Erkenntnissen konkrete Handlungsempfehlungen. Die Komplexität der Kleinteilelogistik erfordert eine Abkehr von starren Lagerstrategien. Stattdessen empfiehlt sich die Implementierung algorithmischer Optimierungsverfahren für die Auftragsbündelung (Order Batching). Studien zeigen, dass hybride genetische Algorithmen die Wegzeiten bei der Kommissionierung signifikant reduzieren können (Mutingi & Mbohwa, 2016). Auch die Anwendung von Ameisenalgorithmen (Ant Colony Optimization) für die Routenplanung in mobilen Ad-hoc-Netzwerken lässt sich auf die Steuerung von Flurförderzeugen oder FTS (Fahrerlose Transportsysteme) im Lager übertragen (Gupta et al., 2012).

Ein weiterer kritischer Aspekt für die Praxis ist die Integration von Nachhaltigkeitszielen. Green Logistics und die Prinzipien der Kreislaufwirtschaft (Circular Economy) sind keine rein regulatorischen Anforderungen mehr, sondern direkte Treiber für Effizienz. Van LUU (Van LUU, 2021) und Tan (Tan, 2021) betonen, dass „Zero Waste“-Strategien nicht nur Abfall reduzieren, sondern durch optimierte Materialflüsse auch Kosten senken. Für einen Kabelhersteller bedeutet dies konkret, Verpackungsmaterialien zu minimieren und Retourenprozesse so zu gestalten, dass Materialien effizient in den Produktionskreislauf zurückgeführt werden können.

Darüber hinaus zeigt die Untersuchung, dass die Leistungsfähigkeit der Supply Chain im E-Commerce-Zeitalter maßgeblich von der Lagerperformance abhängt. Jantapoon (Jantapoon, 2025) weist mittels Machine-Learning-gestützter Analysen nach, dass Smart Warehousing einen direkten positiven Einfluss auf die Performance der letzten Meile hat. Dies

impliziert für das Unternehmen, dass Investitionen in das Kleinteilelager direkte Auswirkungen auf die Kundenzufriedenheit und Liefertreue haben.

### 3.3 Limitationen und Ausblick

Trotz der aufgezeigten Potenziale unterliegt die vorliegende Arbeit gewissen Limitationen. Die Betrachtung der Technologien erfolgte primär auf Basis einer Literaturanalyse; spezifische Implementierungshürden im laufenden Betrieb des Kabelherstellers, wie etwa die Integration in bestehende Legacy-IT-Systeme, konnten nur bedingt berücksichtigt werden. Ramdani et al. (Ramdani et al., 2025) weisen darauf hin, dass die Komplexität von Kundenaufträgen und die Leistungsfähigkeit des bestehenden Logistiksystems den „Task-Technology Fit“ beeinflussen. Nicht jede Technologie ist für jedes Auftragsprofil geeignet.

Zukünftige Forschungsarbeiten sollten sich daher auf die Längsschnittanalyse von Implementierungsprojekten konzentrieren, insbesondere im Hinblick auf das Konzept der „Lights-Out Logistics“ (Yıldız & Çiğdem, 2022). Während der vollautomatisierte Betrieb ohne menschliches Eingreifen als Vision existiert, ist der Weg dorthin für mittelständische Fertigungsunternehmen oft unklar. Weitere Untersuchungen sind notwendig, um zu klären, wie der Übergang von manuellen Prozessen zu hybriden Systemen (Mensch-Maschine-Kollaboration) und schließlich zur Vollautomatisierung ökonomisch sinnvoll gestaltet werden kann.

Abschließend lässt sich festhalten, dass die Optimierung eines Kleinteilelagers kein abgeschlossenes Projekt, sondern einen kontinuierlichen Prozess darstellt. Die Zukunftsfähigkeit wird maßgeblich davon abhängen, wie flexibel das Lagersystem auf neue Marktanforderungen reagieren kann. Die Kombination aus solider Prozessbasis (Lean/5S), intelligenter Datennutzung und selektiver Automatisierung bietet hierfür den vielversprechendsten Ansatz.



## 4. Anhänge

## Literaturverzeichnis

Aboelfotoh, Singh, & Suer. (2019). Order Batching Optimization for Warehouses with Cluster-Picking. *Procedia Manufacturing*, 39, 1464-1473. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.01.302>.

Ackerman. (1990). *Software for Warehousing Operations*. Springer US. [https://doi.org/10.1007/978-1-4757-1194-3\\_49](https://doi.org/10.1007/978-1-4757-1194-3_49)

Deokar. (2017). Improved Methodology for Storage and Quick Retrieval of Hard Files using 5s Principles. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, V(III), 831-837. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2017.3156>.

Gupta, Sadawarti, & Verma. (2012). MANET Routing Protocols Based on Ant Colony Optimization. *International Journal of Modeling and Optimization*, 42-49. <https://doi.org/10.7763/ijmo.2011.v1.83>.

Hamberg. (2011). *Model Support for New Warehouse Concept Development*. Springer London. [https://doi.org/10.1007/978-0-85729-968-0\\_6](https://doi.org/10.1007/978-0-85729-968-0_6)

Jantapoon. (2025). The Impact of Smart Warehousing and Last-Mile Delivery on E-commerce Supply Chain Performance: An Empirical Study Using Machine Learning-Enhanced SEM Analysis. *International Journal of Analysis and Applications*, 23, 101. <https://doi.org/10.28924/2291-8639-23-2025-101>.

Krishnan. (2013). *Integration of Big Data and Data Warehousing*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-405891-0.00010-6>

Mardenli, Sträter, Herrmann, & Sackmann. (2025). The German Act on Corporate Due Diligence Obligations in supply chains: An empirical assessment of the agri-food supply chain based on experts' perspectives. *Cleaner Logistics and Supply Chain*, 16, 100239. <https://doi.org/10.1016/j.clscn.2025.100239>.

Mutingi, & Mbohwa. (2016). *Optimizing Order Batching in Order Picking Systems: Hybrid Grouping Genetic Algorithm*. Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-44394-2\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-319-44394-2_7)

Ramdani, Purnomo, & Mulyati. (2025). The Influence of Order Complexity and Logistics System Capability on Task-Technology Fit and Fulfillment Center Logistics System Capability: A Study on E-Commerce Fulfillment Centers. *Dinasti International Journal of Education Management And Social Science*, 6(6), 4611-4622. <https://doi.org/10.38035/dijemss.v6i6.4859>.

Sharp. (2007). *Warehousing*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420004588.ch12>

Tan. (2021). Zero waste strategies and Turkey's zero waste project. *Environmental Research and Technology*, 4(1), 97-101. <https://doi.org/10.35208/ert.843106>.

Tang, & Liu. (2021). Implementation of Hololens2-Based Augmented Reality Technology in Non-automated Warehouse Picking. IEEE. (pp. 811-815). <https://doi.org/10.1109/aeeca52519.2021.9574354>

Van LUU. (2021). Research on Green Logistics and Business Process Management in the Circular Economy Context. Mendelova univerzita v Brně. (pp. 433-444). <https://doi.org/10.11118/978-80-7509-820-7-0433>

Yusupov, & Umetbayev. (2022). "Smart Warehouse": new technologies for warehouse logistics automation. *Upravlenie kachestvom (Quality management)*(12), 43-53. <https://doi.org/10.33920/pro-01-2212-07>.

Yıldız, & Çiğdem. (2022). *Digital Transformation in Logistics: Lights-Out Logistics*. Özgür Yayınları. <https://doi.org/10.58830/ozgur.pub1.c41>

Zhang. (2024). Simulation and Optimization of Warehouse Shelf Layout Based on Systematic Layout Planning and Flexsim. Aussino Academic Publishing House (AAPH). (pp. 1486-1491). <https://doi.org/10.52202/076061-0197>