

# Entwicklung einer Systematik zur Bewertung der Nachhaltigkeit von Layouts für Paketverteilzentren

Harald Steinkellner<sup>1</sup>, Domenik Kaefer<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Technische Universität Graz – Institut für Technische Logistik

DOI: 10.3217/978-3-85125-995-7-03

## Kurzfassung

Kurier-, Express- und Paketdienste (KEP) haben sich zu einem bedeutenden wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Faktor entwickelt, insbesondere durch das rapide Wachstum des Online-Handels und dem damit einhergehenden Anstieg des Sendungsvolumens. Eine zentrale Rolle im Verteilprozess von Sendungen spielen dabei Paketverteilzentren, die mit der Sortierung von stetig ansteigenden Sendungszahlen konfrontiert sind. Logistikdienstleister stehen vor der Herausforderung, diese ökonomisch getriebenen Anforderungen zu erfüllen, ohne dabei soziale und ökologische Aspekte außer Acht zu lassen.

Diese Arbeit skizziert die Notwendigkeit und Struktur eines Forschungsvorhabens, das darauf abzielt, einen Beitrag für eine nachhaltige Gestaltung von Paketverteilzentren zu leisten. Für die Erstellung von Layouts von Paketverteilzentren sind Bewertungsmethoden nötig, um diese nach ökonomischen, ökologischen und sozialen Aspekten auszulegen. Aufgrund der Komplexität dieser Zentren sind aber noch keine ganzheitlichen Methoden vorhanden, die eine solche umfassende Bewertung erlauben. Ziel des Forschungsvorhabens ist daher die Entwicklung einer Systematik zur Nachhaltigkeits-Bewertung von Paketverteilzentrum-Layouts, welche sich in den Auswahlprozess für die Ermittlung geeigneter Layouts integrieren lässt.

Die geplante Vorgehensweise umfasst eine System- und Nachhaltigkeits-Analyse von Paketverteilzentren, die Erstellung eines abstrahierten Modells eines solchen Zentrums, die Verknüpfung von Nachhaltigkeitsaspekten mit Systemkomponenten und die Entwicklung einer Bewertungssystematik. Diese Systematik soll Entscheidungsträgern zukünftig helfen, fundierte Entscheidungen zu treffen und die Nachhaltigkeitsleistung von Paketverteilzentren zu verbessern, indem Layouts dieser Zentren hinsichtlich ökonomischer, ökologischer und sozialer Aspekte bewertet und ausgewählt werden können.

*Keywords: KEP, Paketverteilzentrum, Nachhaltigkeits-Bewertung, Dimensionen der Nachhaltigkeit, Layout-Gestaltung*

# 1 Einleitung und Motivation

Diese Arbeit präsentiert ein Forschungsvorhaben, welches sich einer der aktuellen Herausforderungen der KEP-Branche widmet: der nachhaltigen Gestaltung von Layouts für Paketverteilzentren unter Berücksichtigung ökonomischer, ökologischer und sozialer Aspekte. Bevor auf die Notwendigkeit und die Vorgehensweise dieses Vorhabens eingegangen wird, werden neben Herausforderungen theoretische Hintergründe zu Paketverteilzentren und zur Nachhaltigkeit erläutert.

## 1.1 Herausforderungen in der KEP-Branche

Die Leistung der KEP-Branche ist seit Jahren ein wichtiger wirtschaftlicher und gesellschaftlicher Faktor. Dies liegt vor allem am anhaltenden Anstieg der Sendungsmengen, insbesondere im Zuge des florierenden Online-Handels und speziell im Business-to-Consumer-Segment (B2C). So erhöhte sich in Deutschland das Sendungsvolumen zwischen 2012 und 2022 um 62,11 % [1]. Global gesehen erhöhte sich dieses Volumen zwischen 2016 und 2022 sogar um 150 % [2].

Neben der steigenden Anzahl von Sendungen sieht sich die Branche mit einer Reihe weiterer Herausforderungen konfrontiert, insbesondere mit Bezug zur ökologischen Nachhaltigkeit. Die Reduzierung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes und die Steigerung der Ressourceneffizienz in Form von geringerem Energieverbrauch und verstärktes Recycling sind von entscheidender Bedeutung [3]. Es wird zunehmend Wert auf die nachhaltige Nutzung bestehender Gebäude und Flächen gelegt, da Bodenressourcen knapp werden [4]. Darüber hinaus herrscht ein Mangel an Fachkräften [5], der – neben dem demografischen Wandel [6] – auch auf belastende Arbeitsbedingungen zurückzuführen ist, womit Bezug zu sozialen Nachhaltigkeitsaspekten gezogen werden kann [7].

Insgesamt steht die Branche vor der komplexen Aufgabe, hohe Sortierleistungen unter sich stets verändernden Rahmenbedingungen zu erzielen und gleichzeitig die Nachhaltigkeitsdimensionen – ökonomisch, ökologisch und sozial – zu berücksichtigen.

## 1.2 Sendungsverteilung durch Paketverteilzentren

Paketverteilzentren spielen eine entscheidende Rolle in der KEP-Branche. Sie gewährleisten durch den Einsatz komplexer Sortiersysteme eine möglichst effiziente Verteilung der Sendungsmengen.

### 1.2.1 Systemabgrenzung

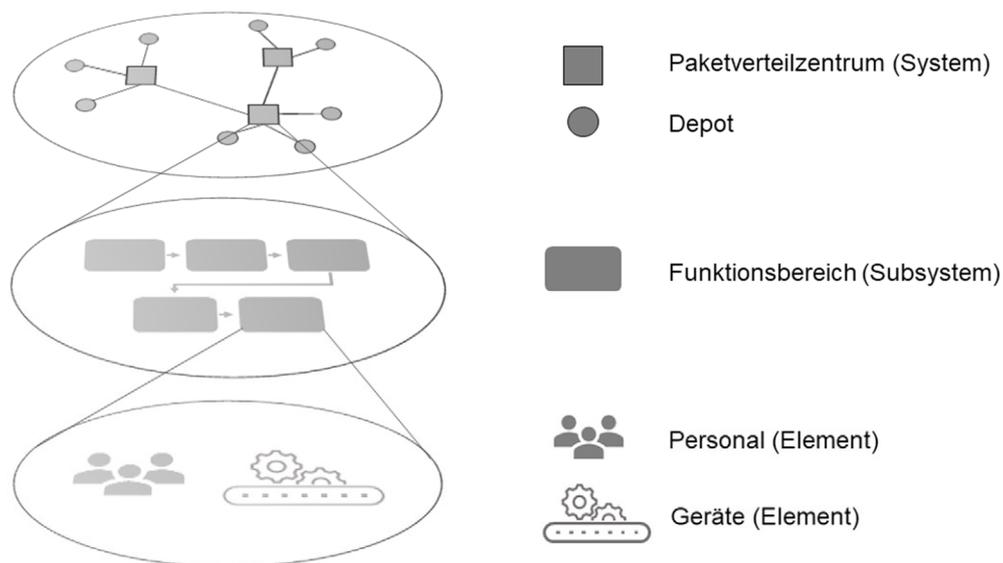
Die Verteilung von Sendungen erfolgt über ein Transportnetzwerk, das aus mehreren Quellen und Senken des Sendungstransports in Form von Knotenpunkten besteht. Diese Knotenpunkte repräsentieren zwei verschiedene Ausführungsvarianten: Sie können entweder als zentrale Sortiereinrichtungen fungieren, die als Paketverteilzentren oder HUBs<sup>1</sup> bezeichnet werden, oder es handelt sich um regionale Empfangs- bzw. Versanddepots [8] [9].

Zwischen diesen Knotenpunkten findet ein Sendungstransport mittels diverser Verkehrsmittel wie Wechselaufbaubrücken (WAB) oder Kleintransporter statt. Die Sortierung der Sendungen, also die

---

<sup>1</sup> Hauptumschlagsbasis

Zuweisung von Zielen, erfolgt innerhalb der Knotenpunkte. Paketverteilzentren nutzen dazu komplexe Sortieranlagen, welche in Funktionsbereiche (Subsysteme) unterteilt werden können. Diese bestehen aus diversen Elementen zur Erfüllung der jeweiligen Funktionen. Dazu gehören neben technischen Komponenten, die der Materialflusstechnik zuzuordnen sind, auch personelle Ressourcen [8] [10]. Abbildung 1 visualisiert diese Betrachtungsweise des Sortier- und Verteilprozesses durch die Darstellung auf mehreren Ebenen.

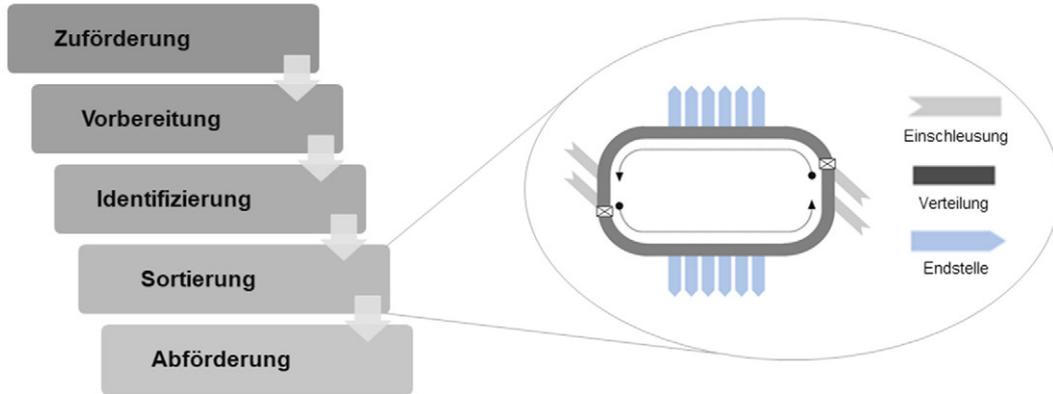


**Abbildung 1:** Paketverteilzentrum aus Systemsicht

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wird der Fokus vom System „Paketverteilzentrum“ abwärts gelegt. Das darüberliegende Transportnetzwerk ist hinsichtlich der Nachhaltigkeitsbetrachtung vor allem aufgrund der dabei auftretenden CO<sub>2</sub>-Emissionen ebenso relevant, wird in diesem Forschungsvorhaben aber nicht betrachtet, da dies den Rahmen des Vorhabens überschreiten würde.

### 1.2.2 Aufbau eines Paketverteilzentrums

Um einen ersten Überblick über die Gestaltungsmöglichkeiten von Paketverteilzentren zu erhalten, werden nachfolgend die wesentlichsten Prozesse innerhalb des Zentrums angeführt. Das „Herzstück“ eines Paketverteilzentrums bildet die Sortieranlage. Wie bereits erwähnt besteht diese aus diversen Funktionsbereichen, welche sich wiederum aus einer Reihe von Funktionen zusammensetzen. Für die Benennung dieser Funktionen sind in der Literatur mehrere Varianten bekannt [8, 10–12]. Im Zuge dieser Arbeit wird die in Abbildung 2 dargestellte Variante gewählt, die sich an [8] und [10] orientiert. Der für die Zielzuweisung hauptverantwortliche Funktionsbereich ist die „Sortierung“. Dieser besteht aus den einzelnen Funktionen „Einschleusung“, „Verteilung“ und „Endstelle“. Einschleusungen speisen den für die Verteilung zuständigen Verteilförderer mit Sendungen. Sobald diese am Förderer ihr zugewiesenes Ziel, d. h. eine Endstelle, die z. B. eine Postleitzahl repräsentiert, erreichen, werden sie in diese Endstelle abgeworfen.



**Abbildung 2:** Funktionen der Sortieranlage (angelehnt an [8, 10])

Entscheidend für die Leistungsfähigkeit der Sortierung in Form von sortierten Sendungen pro Stunde sind außerdem die ihr vor- und nachgelagerten Funktionsbereiche, welche die Grenzen für die Ein- und Ausgabe des Systems darstellen. Die „Zuförderung“ fungiert als Eingangsschnittstelle zwischen den am Paketverteilzentrum ankommenden Verkehrsmitteln und der Sortieranlage. Auf der anderen Seite ist die Abförderung dafür zuständig, die Sendungen, welche am Ende des Sortiervorgangs in den Endstellen gesammelt werden, weiterzuleiten [8].

Sämtliche Funktionsbereiche können in verschiedener Art und Weise gestaltet werden. Dies betrifft u. a. die Auswahl der technischen Komponenten, die grundlegende Topologie des Verteilförderers<sup>2</sup> und die Anordnung und Anzahl von Einschleusungen und Endstellen<sup>3</sup> [8]. Die unterschiedliche Gestaltung führt in weiterer Folge zu unterschiedlichen Sortierleistungen.

Ein Großteil der Prozesse läuft bereits automatisiert ab, jedoch sind nach wie vor eine Reihe manueller Tätigkeiten erforderlich, insbesondere im Bereich der Zu- und Abförderung. Konkrete Beispiele sind die Entladung von Verkehrsmitteln oder die Entleerung der Endstellen [13]. Die Gestaltungsmöglichkeiten im Zentrum sind daher nicht rein technischer Natur; auch die Personaleinsatzplanung ist ein entscheidender Faktor, etwa in Bezug auf die Personalbesetzung je Endstelle<sup>4</sup>.

### 1.2.3 Auslegung von Paketverteilzentren

Paketverteilzentren haben die Aufgabe, möglichst viele Sendungen in kurzer Zeit und fehlerfrei zu sortieren. Diese Leistung wird als Durchsatz<sup>5</sup> bezeichnet. Der Durchsatz wird maßgeblich durch das Layout<sup>6</sup> des Zentrums bestimmt, welches – wie in Abschnitt 1.2.2 erwähnt – auf vielfältige Weise gestaltet werden kann. Zur Auslegung sind daher verschiedene Layouts auf deren Durchsatz zu prüfen, um darauf basierend eine geeignete Wahl treffen zu können.

<sup>2</sup> Dieser kann als Linie, geschlossener Loop oder als Kreis ausgeführt sein [13].

<sup>3</sup> Eine Auflistung dieser Gestaltungsmöglichkeiten übersteigt den Rahmen dieser Arbeit; für Details siehe [8].

<sup>4</sup> Eine Person kann beispielsweise für die Entleerung von nur einer Endstelle oder für mehrere verantwortlich sein.

<sup>5</sup> Ist gleich der fördertechnischen Leistung des Sortiersystems in Förderereinheiten pro Zeiteinheit [8].

<sup>6</sup> Als Layout wird die „Darstellung eines Systems in seiner flächenmäßigen oder räumlichen Anordnung in Form von Zeichnungen oder Modellen“ bezeichnet [14].



Zur Bestimmung des Durchsatzes bestehen mehrere Möglichkeiten. Dazu gehören analytische Methoden, wie [8] sie beschreibt. Hier wird ein theoretisch maximal möglicher technischer Grenzdurchsatz definiert, der durch die Geschwindigkeit des Verteilförderers und den minimalen Abstand zwischen den zu sortierenden Sendungen am Verteilförderer bestimmt wird. Zudem bestehen Vorschriften, die den Einfluss der Ein- und Ausschleusungsbereiche hinsichtlich des Durchsatzes definieren [8, 13]. Ein realitätsnäherer Wert wird durch den betrieblichen Durchsatz repräsentiert, der durchsatzmindernde Ursachen berücksichtigt. Zu diesen Ursachen gehört u. a. die Situation, dass keine Sendungen zur Einschleusung bereit sind, etwa durch Probleme bei der Zuförderung [8]. Die Ermittlung des betrieblichen Durchsatzes ist aufgrund der Komplexität analytisch nicht möglich, weshalb Simulationsmethoden erforderlich sind [15].

Zu diesen Methoden gehört u. a. die diskrete ereignisorientierte Materialflusssimulation<sup>7</sup>. Charakteristisch für diskrete Modelle ist, dass sich Modellzustände nur zu gewissen, diskreten Zeitpunkten ändern – bei der ereignisorientierten Simulation wird diese Zustandsänderung über durch das Auftreten von Ereignissen verursacht. Folglich muss das Modell nur zu diesen Zeitpunkten betrachtet werden [16]. Diese Methode ist nach [17] besonders geeignet, um komplexe logistische Systeme abzubilden und wird daher auch genutzt, um Layouts von Paketverteilzentren zu prüfen und zu ermitteln.

### 1.3 Terminologie und Dimensionen der Nachhaltigkeit

Der Begriff "Nachhaltigkeit" wird heutzutage in vielfältiger Weise diskutiert. Eine moderne Definition wurde im Rahmen des Abschlussberichtes „Our Common Future“ der Brundtland Commission im Jahr 1987 geprägt: Hier wurde festgehalten, dass die Nachhaltigkeit als entscheidender Gradmesser für die Zukunftsgestaltung gesehen wird [18]. Aus unternehmerischer Sicht wird darunter verstanden, erzielte Gewinne auch ökologisch und sozial zu rechtfertigen [18]. Allgemein steht Nachhaltigkeit für verantwortungsvolles und ressourcenorientiertes zukunftsorientiertes Handeln [19].

Nachhaltigkeit beruht dabei auf ökonomischen, ökologischen und sozialen Aspekten. **Ökonomische Nachhaltigkeit** zielt darauf ab, die Wirtschaftskraft zu stärken und gleichzeitig die gewünschte Lebensqualität der Verbraucher zu erhalten. Dies kann durch die Förderung von Innovationen, Investitionen in Anlagen, Steigerung der Arbeitsproduktivität und erhöhte Ausgaben für Forschung und Entwicklung erreicht werden. **Ökologische Nachhaltigkeit** bedeutet, dass biologische Systeme ihre Funktionen und Prozesse langfristig erhalten können. Das erfordert eine Nutzung erneuerbarer Ressourcen in einem Maß, das ihre Regeneration ermöglicht, während die Erzeugung von Verschmutzung minimiert und der Abbau nicht erneuerbarer Ressourcen auf ein nachhaltiges Niveau begrenzt wird. **Soziale Nachhaltigkeit** befasst sich mit der Frage, wie globaler Wohlstand und Frieden langfristig erreicht werden kann. Sie legt besonderen Wert auf die Erfüllung menschlicher Bedürfnisse, wobei Themen wie weltweite Einkommensverteilung und ein würdevolles Leben im Mittelpunkt stehen. Es stehen dabei u. a. Fragen der Chancengleichheit und Arbeitsbedingungen im Fokus [3].

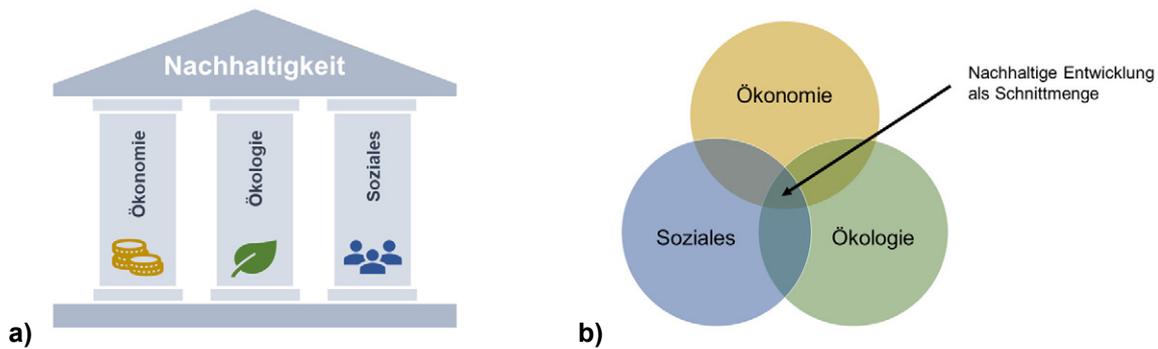
Es existieren verschiedene Modelle, welche das Zusammenspiel all dieser Aspekte visualisieren. Ansätze hierzu sind, dass nur die Berücksichtigung aller drei Aspekte „die Nachhaltigkeit trägt“ (Drei-

---

<sup>7</sup> Diese wird auch als Discrete-Event-Simulation (DES) bezeichnet.

Säulen-Modell) oder das die Nachhaltigkeit als Schnittmenge aller drei Aspekte gebildet wird (Venn-Diagramm) [3]<sup>8</sup> (vgl. Abbildung 3).

Die Ziele für nachhaltige Entwicklung (Sustainable Development Goals – SDGs), definiert im Rahmen der Agenda 2030, bieten wichtige Leitlinien für die Integration von Nachhaltigkeitsprinzipien in alle Wirtschaftsbereiche, einschließlich der Logistikbranche [20].



**Abbildung 3:** Dimensionen der Nachhaltigkeit a) Säulen-Darstellung b) Venn-Diagramm (angelehnt an [3])

Um Entscheidungsträgern eine Möglichkeit zu geben, Systeme, Prozesse, Produkte, etc. nachhaltig zu gestalten, bedarf es Ansätze zur Bewertung und quantitativen Darstellung. Eine umfassende Übersicht zur Analyse und Bewertung der Nachhaltigkeit findet sich in [21]. Die Arbeit zielt darauf ab, verschiedenste Wissenschaftsdisziplinen und Branchen damit anzusprechen und deckt zudem sämtliche Dimensionen der Nachhaltigkeit. Die Autoren weisen allerdings daraufhin, dass die Herangehensweise der Nachhaltigkeitsbewertung an den konkreten Anwendungsfall angepasst werden muss. Zudem wird angemerkt, dass die soziale Nachhaltigkeit noch stark vernachlässigt wird.

## 1.4 Problemstellung im Paketverteilzentrum

Angesichts der Komplexität des Systems „Paketverteilzentrum“ ergeben sich im Rahmen der Auslegung zahlreiche Lösungsvarianten (Layouts) für ein und dieselbe Anforderungsdefinition. Das Ziel besteht darin, das am besten geeignete, wenn nicht sogar optimale Layout zu finden. Dabei ist zu beachten, dass der Begriff "optimal" relativ zu betrachten ist, insbesondere wenn ein Paketverteilzentrum unter Berücksichtigung aller drei Nachhaltigkeitsdimensionen gestaltet werden soll: Ein ökologisch optimales Paketverteilzentrum wird ein anderes Layout aufweisen als ein ökonomisch optimales.

Die Ermittlung eines Optimums bzw. eine Auswahl durch Vergleich erfordert in der Regel eine quantitative Bewertung. Um dabei alle Dimensionen der Nachhaltigkeit zu berücksichtigen, ist es daher notwendig, deren Ausprägung zu quantifizieren. Zur Bewertung und Quantifizierung stehen nun mehrere Möglichkeiten zur Verfügung. Die einfachste Variante sind direkt messbare Leistungsindikatoren, die einer oder mehreren Säulen zugeordnet werden können, wie beispielsweise der Energie- oder

<sup>8</sup> Im weiteren Verlauf der Arbeit werden die drei Säulen als „Dimensionen der Nachhaltigkeit“ bezeichnet.

Flächenverbrauch (ökologisch bzw. auch ökonomisch), der Durchsatz (ökonomisch) und der Geräuschpegel (sozial). Daneben gibt es umfassendere und allgemeingültigere Ansätze, wie bereits in Abschnitt 1.3 erwähnt wurde [21]. Dazu zählt etwa das Life Cycle Sustainability Assessment (LCSA), welches zur ganzheitlichen lebenszyklusbasierten Nachhaltigkeitsbewertung von Produkten und Dienstleistungen eingesetzt wird. Zu dessen Schwächen gehört allerdings, dass es Wechselwirkungen und Beziehungen zwischen einzelnen System-Aspekten außer Acht lässt [21].

Speziell für Paketverteilzentren existieren weitere Möglichkeiten, einzelne Subsysteme und Elemente zu bewerten. [22] hat beispielsweise Kennzahlen entwickelt, welche eine quantitative Bewertung der Energieeffizienz von Geräten der Materialflusstechnik ermöglicht. [23] beschäftigt sich mit der Bewertung von körperlichen Belastungen im Rahmen typischer intralogistischer Prozesse.

[24] liefert auf Systemebene einen Beitrag zur ökologischen Nachhaltigkeit, indem untersucht wird, wie der Energieverbrauch direkt einzelnen Paketen zugeordnet werden kann. Dabei wird besonders auf den zurückgelegten Weg des Paketes Rücksicht genommen, der wiederum vom Layout des Paketverteilzentrums abhängt.

Der komplexe Aufbau von Paketverteilzentren führt hier zur Problemstellung. Erste Literaturrecherchen haben gezeigt, dass es eine Vielzahl an Ansätzen gibt, die sich der Bewertung einzelner Elemente und Subsysteme widmen, und auch ganzheitliche Ansätze, welche aber Schwächen bei komplexen Systemen zeigen. Es fehlt allerdings ein geeigneter Ansatz, der es erlaubt, ein Layout eines Paketverteilzentrums kompakt durch Angabe eines quantitativen Wertes für jede Dimension der Nachhaltigkeit zielführend zu bewerten.

## 2 Forschungsziel

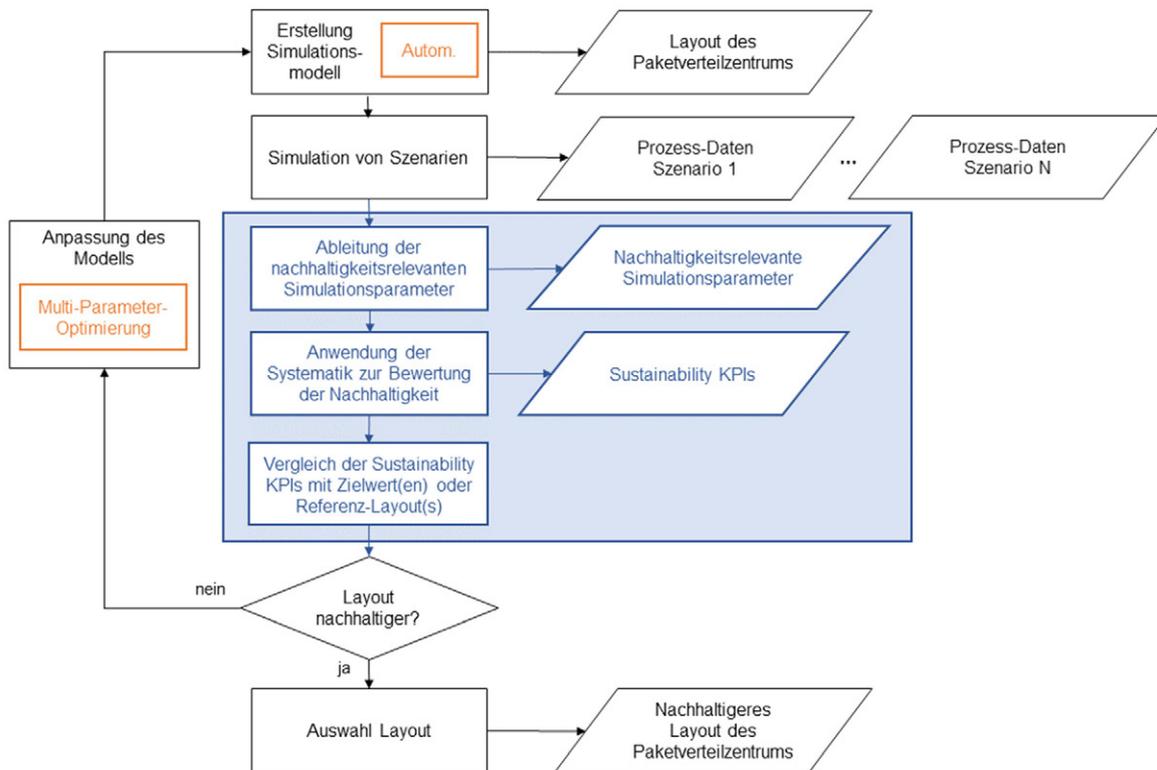
Das angestrebte Forschungsvorhaben soll einen Beitrag zu einer effizienteren und nachhaltigeren Gestaltung von Paketverteilzentren leisten, indem die folgende Fragestellung beantwortet werden soll:

Können die einzelnen Einflüsse der diversen System-Komponenten eines Paketverteilzentrums auf die ökologische, soziale und ökonomische Nachhaltigkeit quantitativ erfasst und auf System-Ebene zusammenfassend bewertet werden, um damit die Gestaltung und den Vergleich von verschiedenen Layouts eines Paketverteilzentrums zu unterstützen?

### 2.1 Lösungsansatz

Zur Beantwortung dieser Frage soll eine Systematik geschaffen werden, mittels welcher ein Layout eines Paketverteilzentrums für jede Dimension der Nachhaltigkeit einen konkreten Wert erhält. Diese drei Werte – in weiterer Folge als „Sustainability KPIs“ bezeichnet – setzen sich aus nachhaltigkeitsrelevanten Parametern zusammen, die sich aus dem Sortiervorgang ergeben. Diese Parameter repräsentieren den Einfluss der diversen System-Komponenten auf die Dimensionen der Nachhaltigkeit – Beispiele hierfür sind der erreichte Durchsatz, die zurückgelegten Laufwege einer Person oder der Energieverbrauch des Verteilförderers.

Abbildung 4 zeigt, wie die Systematik in den Prozessablauf für eine geeignete Layout-Wahl einfließen soll. Der im Forschungsvorhaben zu behandelnde Teil ist dabei blau hinterlegt.



**Abbildung 4:** Einsatz der Systematik zur Nachhaltigkeits-Bewertung im Rahmen der Layout-Ermittlung von Paketverteilzentren

Um nachhaltigkeitsrelevante Parameter abzuleiten, ist zunächst die Generierung von Prozess-Daten erforderlich. Dies kann mithilfe eines Simulationsmodells erfolgen, das beispielsweise durch diskrete ereignisorientierte Simulation (DES) erstellt wurde. Für eine umfassendere Betrachtung ist es vorteilhaft, mehrere Szenarien zu simulieren, die durch verschiedene Rahmenbedingungen definiert sind. Anschließend greift die Systematik, die darauf abzielt, Sustainability KPIs zu generieren. Diese dienen dazu, einen Vergleich für das Zentrum durchzuführen, etwa mit einem Referenzlayout oder einem Zielwert.

## 2.2 Ausblick auf weiteres Potenzial

Die in Abbildung 4 orange markierten Felder sollen einen Ausblick auf weitere Möglichkeiten für eine effizientere Auslegung von Paketverteilzentrum-Layouts geben. Die Generierung von Simulationsmodellen ist mit erheblichem Aufwand verbunden. Durch automatische Modellgenerierung, bei der durch die Vorgabe von Rahmenbedingungen und Anforderungen ein fertiges Layout ohne manuellen Aufwand erstellt wird, kann dieser Aufwand erheblich reduziert werden.

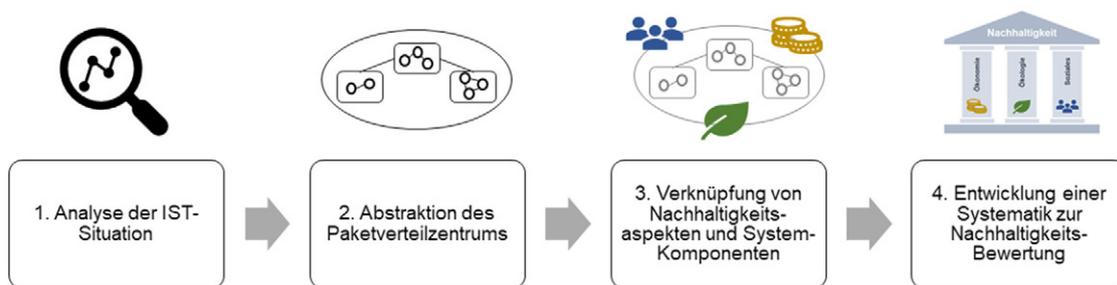
Eine Weiterentwicklung der automatischen Modellerstellung besteht darin, dass durch Multi-Parameter-Optimierung tatsächliche Optima ermittelt werden und somit das bestmögliche Layout, vorzugsweise unter Berücksichtigung aller Nachhaltigkeitsaspekte, ermittelt wird.

### 3 Umsetzung des Forschungsvorhabens

Durch eine vorläufige Literaturrecherche wurde bereits die Dringlichkeit des Vorhabens verdeutlicht, sowie mögliche Ansätze zur Behandlung der Thematik identifiziert. Es besteht jedoch noch Bedarf an einer umfassenderen Untersuchung, speziell bezüglich bereits etablierter Methoden zur Nachhaltigkeits-Bewertung, um sicherzustellen, dass das Forschungsvorhaben auf einer fundierten Grundlage aufbaut, bevor mit der konkreten Umsetzung (vgl. Abschnitt 3.1) begonnen wird.

#### 3.1 Vorgehensweise

Um die in Abschnitt 2.1 definierte Frage zu beantworten, wird die in Abbildung 5 dargestellte Vorgehensweise angewendet, die nachfolgend kurz erläutert wird.



**Abbildung 5:** Vorgehensweise des Forschungsvorhabens

**Schritt 1 – Analyse der IST-Situation:** Eine umfassende Systemanalyse des Paketverteilzentrums wird durchgeführt, wobei relevante Komponenten und Prozesse sowie leistungsrelevante Parameter identifiziert und analysiert werden. Darüber hinaus werden Möglichkeiten zur Auslegung des Zentrums untersucht und Leistungskennzahlen sowie Metriken erfasst, um die Effizienz und Produktivität quantitativ zu bewerten.

Die Analyse umfasst weiters die Bewertung der Nachhaltigkeitsaspekte im Paketverteilzentrum und deren Integration sowohl in die Gestaltung als auch den laufenden Betrieb. Zudem werden vorhandene Ansätze zur Nachhaltigkeitsbewertung identifiziert, und deren mögliche Anwendung im Paketverteilzentrum geprüft. Neben Literaturrecherchen werden Experteninterviews durchgeführt und reale Anlagen besichtigt, um ein umfassendes Bild der aktuellen Situation zu erhalten.

**Schritt 2 – Abstraktion des Paketverteilzentrums:** Basierend auf den Erkenntnissen der IST-Analyse wird ein abstraktes Modell eines Paketverteilzentrums entwickelt, welches die wesentlichen Funktionen, Prozesse und Komponenten abbildet. Die Abstrahierung erfolgt, indem das System „Paketverteilzentrum“ in Subsysteme unterteilt wird, welche wiederum aus Elementen und deren Einflussparametern bestehen (vgl. Abbildung 1). Diese Elemente repräsentieren neben technischen Komponenten (Geräte) auch das am Prozess beteiligte Personal. Besonderes Augenmerk wird auf die Verknüpfung zwischen den Komponenten und deren Einfluss untereinander gelegt.

Zudem werden Flexibilitäts- und Skalierbarkeitsaspekte berücksichtigt, um sicherzustellen, dass das abstrakte Modell auf verschiedene Paketverteilzentren angewendet werden kann, unabhängig von ihrer Größe und Technologie.

**Schritt 3 – Verknüpfung von Nachhaltigkeitsaspekten und System-Komponenten:** In diesem Schritt werden die Nachhaltigkeitsaspekte (ökonomisch, ökologisch, sozial) eng mit den einzelnen Komponenten des Paketverteilzentrums verknüpft. Dazu wird im Detail untersucht, wie jede Komponente (Subsysteme und Elemente) des Paketverteilzentrums jeweils die ökonomische, ökologische und soziale Nachhaltigkeit beeinflusst.

Es werden nachhaltigkeitsrelevante Parameter definiert, d. h. spezifische Einflussfaktoren und Indikatoren, welche die Nachhaltigkeitsleistung jeder Komponente erfassen. Diese Faktoren können beispielsweise die Energieeffizienz und Arbeitsbedingungen umfassen. Diese sind wiederum abhängig von den diversen Gestaltungsvarianten der Subsysteme und Elemente.

**Schritt 4 – Entwicklung einer Systematik zur Nachhaltigkeits-Bewertung:** Es wird eine Systematik entwickelt, welche die Bewertung und den Vergleich verschiedener Layouts von Paketverteilzentren ermöglicht. Als Ergebnis entstehen hier die sogenannten „Sustainability KPIs“, welche dem Paketverteilzentrum auf Systemebene einen quantitativen Wert für jede Dimension der Nachhaltigkeit zuweist. Diese KPIs basieren auf den nachhaltigkeitsrelevanten Parameter der einzelnen Subsysteme und Elemente.

Die Herausforderung besteht darin, die Vielzahl der nachhaltigkeitsrelevanten Parameter mittels geeigneter Methoden angemessen zusammenzufassen. Dazu werden u. a. Bewertungsvorschriften definiert, die den unterschiedlichen Grad der Einflüsse auf die Nachhaltigkeit berücksichtigen. Dabei wird darauf geachtet, dass sich diese Parameter gegenseitig beeinflussen und bestimmte Parameter Auswirkungen auf mehrere Dimensionen der Nachhaltigkeit haben können.

## 3.2 Erwartete Ergebnisse

Es entsteht eine Systematik, welche es erlaubt, ein Layout eines Paketverteilzentrums hinsichtlich ökologischer, ökonomischer und sozialer Nachhaltigkeit zu bewerten und dadurch den Vergleich mit anderen Layouts ermöglicht. Diese Systematik wird anhand eines realitätsnahen Beispiels angewendet, um ihren Nutzen zu verdeutlichen und sie anhand konkreter Ergebnisse auf Verbesserungs- und Fehlerpotenzial zu prüfen. Zur Anwendung wird der in Abbildung 4 dargestellte Prozess verwendet, wobei zur Modellerstellung und Parameterermittlung die diskrete ereignisorientierte Simulation (DES) genutzt wird.

Als weiteres Ergebnis entsteht eine detaillierte Systemanalyse eines Paketverteilzentrums, die aus relevanten Subsystemen, Elementen und Parametern besteht. Diese kann als Ausgangspunkt für weitere Entwicklungen dienen, wie beispielsweise die automatische Modellgenerierung, die in Abschnitt 2.2 angesprochen wird.

Insgesamt soll die entwickelte Systematik die nachhaltigere Gestaltung von Paketverteilzentren fördern, indem alle Dimensionen der Nachhaltigkeit quantitativ berücksichtigt werden können bzw. auch

eine Priorisierung oder Gewichtung der drei Dimensionen erfolgen kann. Darüber hinaus besteht das Potenzial, diese Systematik auf andere Logistikprozesse auszuweiten, um eine ganzheitliche Bewertung der Nachhaltigkeit in verschiedenen Bereichen der Logistik zu ermöglichen. Beispiele hierfür könnten die Gestaltung von Lagern oder Produktionsstätten sein.

## 4 Zusammenfassung

Das Ziel dieser Arbeit bestand darin, ein Forschungsvorhaben vorzustellen, welches einen Beitrag zur nachhaltigeren Gestaltung von Paketverteilzentren in der KEP-Branche leisten soll. Hierbei wurden die Herausforderungen der KEP-Branche beleuchtet und die Rolle dieser Paketverteilzentren erläutert. Eine besondere Herausforderung besteht darin, geeignete Layouts für diese Zentren unter Berücksichtigung sozialer, ökologischer und ökonomischer Aspekte bestmöglich auszulegen.

Es wurden erste vorläufige Literaturrecherchen durchgeführt, um auf die Komplexität dieser Paketverteilzentren hinsichtlich Aufbau und Auslegung hinzuweisen. Weiters wurde erkannt, dass zwar bereits Ansätze zur nachhaltigen Gestaltung existieren, jedoch noch ein geeigneter ganzheitlicher Vergleich für die Auslegung von Paketverteilzentrums-Layouts fehlt.

Daher wurde eine Vorgehensweise vorgestellt, die darauf abzielt, eine Systematik zu entwickeln, welche eine umfassende Bewertung eines Paketverteilzentrums ermöglicht. Diese umfasst umfangreiche Analysen der aktuellen Nachhaltigkeitssituation in Paketverteilzentren, die Erstellung eines abstrahierten Modells eines Paketverteilzentrums, die Identifizierung und Bewertung von nachhaltigkeitsrelevanten Parametern und deren Verknüpfung zu einzelnen Systemen, sowie schlussendlich die Entwicklung einer Systematik zur Gesamtbewertung.

Da es sich um ein geplantes Forschungsvorhaben handelt, liegen noch keine Ergebnisse zur Anwendung der Systematik vor. Die Systematik soll es aber Planern, Betreibern und Entscheidungsträgern zukünftig ermöglichen, eine ganzheitliche Perspektive einzunehmen und die Nachhaltigkeitsleistung von Paketverteilzentren systematisch zu verbessern.

In weiterer Folge kann diese Systematik auch in weiteren Gebieten der Intralogistik Einzug finden. Zudem kann dieses Forschungsvorhaben unterstützend für weitere Entwicklungen im Bereich der Layout-Gestaltung von Paketverteilzentren dienen: Die Systemanalyse und Abstraktion eines Paketverteilzentrums leistet einen Beitrag zur Weiterentwicklung der automatischen Modellgenerierung, da diese ein exaktes Systemverständnis erfordert.

## Author Contributions

Conceptualization, H.S., D.K.; methodology, H.S.; investigation, H.S.; writing – original draft preparation, H.S.; writing – review and editing, H.S., D.K.; visualization, H.S.; supervision, D.K.; project administration, H.S. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

## 5 Literaturverzeichnis

- [1] K. Esser and J. Kurte, "KEP-Studie 2023 - Analyse Des Marktes in Deutschland. Eine Untersuchung Im Auftrag Des Bundesverbandes Paket Und Expresslogistik e. V. (BIEK)," 2023.
- [2] Pitney Bowes, "Parcel Shipping Index 2023," 2023. Accessed: Apr. 15, 2023.
- [3] M. Harwardt, *Ökologische Nachhaltigkeit im E-Commerce: Grundlagen, Ansätze und Handlungsempfehlungen*. Wiesbaden: Springer Gabler, 2023.
- [4] ÖROK. "Monitoring von Flächeninanspruchnahme und Versiegelung." Accessed: Apr. 20, 2024. [Online]. Available: <https://www.oerok.gv.at/monitoring-flaecheninanspruchnahme>
- [5] Bitkom. "Digitalisierung der Logistik." Accessed: Apr. 20, 2024. [Online]. Available: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1088664/umfrage/umfrage-zu-personaldefiziten-von-logistikunternehmen-nach-berufen/>
- [6] M. Mohr and V. Cernovskij. "Fachkräftemangel in Österreich: Statista Overview-Report zur Personalknappheit in Österreich." Accessed: Apr. 20, 2024. [Online]. Available: <https://de.statista.com/statistik/studie/id/136465/dokument/fachkraeftemangel-in-oesterreich/>
- [7] M. Certa and T. Schröder, "Die Logistik im Fokus empirischer Analysen: Arbeitsbedingungen und Arbeitsfähigkeit in der Lagerwirtschaft sowie den Post- und Zustelldiensten," *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft*, vol. 75, pp. 251–265, 2021.
- [8] D. Jodin and M. ten Hompel, *Sortier- und Verteilsysteme: Grundlagen, Aufbau, Berechnung und Realisierung*, 2nd ed. Berlin: Springer Vieweg, 2012.
- [9] S. Blunck, "Modellierung und Optimierung von Hub-and-Spoke-Netzen mit beschränkter Sortierkapazität," Dissertation, Universität Karlsruhe (TH), Karlsruhe, 2005.
- [10] M. ten Hompel, Schmidt Thorsten, and J. Dregger, *Materialflusssysteme: Förder- und Lagertechnik*, 4th ed. Berlin: Springer Vieweg, 2018.
- [11] N. Boysen, D. Briskorn, S. Fedtke, and M. Schmickerath, "Automated sortation conveyors: A survey from an operational research perspective," *European Journal of Operational Research*, no. 276, pp. 796–815, 2019.
- [12] D. Prims, "Bedeutung der Virtuellen Inbetriebnahme von Fördertechnik für die Paketvereinzelung," *e-commerce: Gerätetechnik, Software, Organisation, Geschäftsmodelle: Logistikwerkstatt Graz 2021, 07.-08.10.2021*, pp. 138–146, 2021.
- [13] C. Landschützer, H. Steinkellner, and C. Beumer, "Sortier- und Verteilsysteme," in *Handbuch Logistik*, K. Furmans, M. Henke, H. Tempelmeier, M. ten Hompel, and T. Schmidt, Eds., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2024.
- [14] P. Klaus, W. Krieger, and M. Krupp, *Gabler Lexikon Logistik: Management logistischer Netzwerke und Flüsse*. Wiesbaden: Gabler Verlag, 2012.

- [15] A. Radtke, "Beitrag zur Entwicklung optimierter Betriebsstrategien für Sortiersysteme," Dissertation, Universität Dortmund, Dortmund, 2000.
- [16] S. Wenzel, "Simulation logistischer Systeme," in *Handbuch Logistik*, K. Furmans, M. Henke, H. Tempelmeier, M. ten Hompel, and T. Schmidt, Eds., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2024.
- [17] M. Eley, *Simulation in der Logistik: Einführung in die Erstellung ereignisdiskreter Modelle unter Verwendung des Werkzeuges "Plant Simulation"* Springer Berlin Heidelberg, 2012.
- [18] K. Mayer, *Nachhaltigkeit: 111 Fragen und Antworten*. Wiesbaden: Springer Gabler, 2017.
- [19] K. O. Tokarski, J. Schellinger, and P. Berchtold, Eds. *Nachhaltige Unternehmensführung: Herausforderungen und Beispiele aus der Praxis*. Wiesbaden: Springer Gabler, 2019.
- [20] SDG Compass. "Learn More About the SDGs." Accessed: Apr. 14, 2024. [Online]. Available: <https://sdgcompass.org/sdgs/>
- [21] L. Andes, T. Lützkendorf, B. Ströbele, J. Kopfmüller, and C. Rösch, "Methodensammlung zur Nachhaltigkeitsbewertung: Grundlagen, Indikatoren, Hilfsmittel," Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2019.
- [22] F. Lottersberger, "Beitrag zu einer energieeffizienten Materialflusstechnik: Grundlagen zur Ermittlung, zum Vergleich und zur Steigerung der Energieeffizienz," Dissertation, Technische Universität Graz, Graz, 2016.
- [23] D. Loske, M. Klumpp, M. Keil, and T. Neukirchen, "Logistics Work, Ergonomics and Social Sustainability: Empirical Musculoskeletal System Strain Assessment in Retail Intralogistics," *Logistics*, vol. 5, no. 4, 2021. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2305-6290/5/4/89>
- [24] G. Mahringer, C. Landschützer, and M. Steger, "Untersuchung der Auswirkung des Layouts von Paketverteilzentren auf die Anzahl der Kreisläufer am Sortier- und Verteilförderer mittels vereinfachter Modellbildung und Materialflusssimulation," in *Jahrbuch der Logistikforschung: Innovative Anwendungen, Konzepte & Technologien*, T. Wakolbinger, Ed., Linz: Trauner Verlag, 2023, pp. 133–145.